



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MATTI KILJUNEN

RUISKUTETTAVAN POLYURETAANIN LÄMPÖ- JA KOSTEUS-
TEKNINEN TOIMIVUUS KORJAUSRAKENTAMISESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
nassa 15. tammikuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KILJUNEN, MATTI: Ruiskutettavan polyuretaanieristeen lämpö- ja kosteustekninen toimivuus korjausrakentamisessa

Diplomityö, 77 sivua, 31 liitesivua

Tammikuu 2014

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

Avainsanat: Ruiskutettava polyuretaanieriste, kosteus, lämpö, kriittiset olosuhteet, homeen kasvu, korjausrakentaminen

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ruiskutettavan Ekospray-polyuretaanieristeen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta korjausrakentamisessa laskennallisilla keinoilla. Laskennallisissa tarkasteluissa pyrittiin selvittämään tyypillisten korjattavien pien- ja kerrostalojen ulkoseinien ja alapohjien ja niiden liitoskohtien homehtumis- ja kondensoitumisriskiä. Lisäksi pyrittiin löytämään kyseisille rakenteille toimivia Ekosprayllä toteutettavia korjausrakennusratkaisuja. Rakenteiden eristevahvuuksia määritettäessä pidettiin vaatimustasona Suomen Rakentamismääräyskokoelman korjausrakentamista koskevia uusia energiankulutusmääräyksiä.

Lämpö- ja kosteustekninen laskenta suoritettiin Wufi 2D 3.3 -ohjelmalla. Mitoittavina sisä- ja ulkoilman olosuhteina käytettiin Suomen ilmastossa kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä mitoitusolosuhteita. Kriittiset mitoitusolosuhteet on määritetty Tampereen teknillisessä yliopistossa aiemmin tehtyjen projektien yhteydessä. Sisäilman lämpötilana laskennassa käytettiin 21 °C ja kosteuslisänä 5 g/m³ talviaikana ja 2 g/m³ kesäaikana. Ulkoilman olosuhteina käytettiin Jokioisten vuoden 2004 ja Vantaan vuoden 2007 ulkoilmanolosuhteita. Homeen kasvua tutkittiin laskennallisesti VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän laskentamallin avulla, jossa homeen kasvua kuvataan homeindeksillä (M). Hyväksyttävänä rajana pidettiin homeindeksin arvoa $M \leq 1$, joka tarkoittaa sitä, että homeenkasvu ei ole sallittu tarkasteltavassa kohdassa.

Tehtyjen tarkastelujen mukaan riskittömiä korjausratkaisuja ovat betoniset ulkopuolelta eristetyt ulkoseinärakenteet ja ryömintätilaiset alapuolelta eristetyt alapohjarakenteet. Näissä rakenteissa ei esiintynyt kosteuden tiivistymistä eikä homeen kasvua. Puurankarakenteissa ulkoseinissä puu- tai tiiliverhoiltu tuuletettu ulkoseinärakenne toimii, kun Ekospraytä käytetään samanaikaisesti puurangan ulkopuolella ja puurankojen välissä. Puurankarakenteissa ulkoseinissä kriittiseksi muodostuu kuitenkin helposti seinän ja sokkelin liittymä kohdat, joihin on kiinnitettävä erityistä huomiota. Puurakenteissa ryömintätilaisissa alapohjarakenteissa Ekospray toimii yleensä alapuolella lisäeristyskeinona. Puurakenteiden ryömintätilaisten alapohjien lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa kuitenkin oleellisesti myös Ekospray eristeen sisäpuolelle jäävän vanhan eristemateriaalin paksuus ja ominaisuudet, kuten hygroskooppisuus ja lämmönjohtavuus, jonka johdosta korjausrakennusratkaisut tulee harkita ja miettiä aina tapauskohtaisesti. Massiivitiiliseinissä, hirsiseinissä ja betoniseinissä voidaan myös toteuttaa toimivia korjausratkaisuja käyttämällä Ekospray eristettä rakenteen sisäpuolella. Näissä rakenteissa oleellinen merkitys rakenteen kosteustekniseen toimintaan on ulkopuolisen viistosateen tunkeutumisella rakenteeseen ja rakenteen kuivumiskyvyllä. Rakennusratkaisut ja yksityiskohdat tuleekin suunnitella huolellisesti ottaen huomioon mahdollinen ylimääräinen kosteuden pääsy rakenteeseen sekä rakenteen kuivumismahdollisuus.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Construction Technology

KILJUNEN, MATTI: Hygrothermal behaviour of sprayed polyurethane foam insulation in renovation

Master of Science Thesis, 77 pages, 31 Appendix pages

January 2014

Major: Construction Engineering

Examiner: Professor Juha Vinha

Keywords: Sprayed polyurethane foam insulation, moisture, heat, critical conditions, mould growth, renovation

The first goal of this thesis was to study hygrothermal behaviour of sprayed polyurethane foam insulation Ekospray in renovation. The second goal of this thesis was to study mold growth in modeled structures and at the same time find properly technical solutions in renovation. The analyses were made of external walls and floor structures and their joints in typical high-rises and single-family houses. The insulation thickness of external walls was defined to present new energy requirements of the Finnish Building Code in renovation.

The hygrothermal calculation was carried out using Wufi 2D 3.3 software. Structures were examined in Finnish climatic conditions with critical climate in terms of condensation and mold growth. The critical test years are defined in earlier projects made in Tampere University of Technology. The indoor air climate was selected so that temperature was 21 °C and excess moisture values varied between 2 (summer time) and 5 (winter time) g/m³. The test years used for calculation were the climates occurred in Jokioinen 2004 and in Vantaa 2007. For the mold growth-rate calculation, the model developed by the co-operation of VTT and TTY was used. In this model mould growth is described by Mould index M. The limit value of Mould index was set ≤ 1 , which means that mould growth is not accepted in analysed target place.

According to the analysis it is safety use Ekospray insulation outside external walls and ventilated base floors made of concrete. In these structures there was no sign of condensation or mold growth.

When using Ekospray in external walls, made of timber, the Ekospray insulation must be used at the same time in the wall structure and outside the wall structure. The critical points in timber walls are the joints of walls and foundations and these joints must be designed separately in every case. In ventilated base floor structures made of timber the Ekospray insulation can be usually used as an extra insulation outside the structure. However, the hygrothermal performance of the structure is dependent on such things like hygroscopic, thickness and thermal conductivity of the old insulation. This is the reason why every solution must be considered separately.

In massive external walls made of logs, bricks or concrete, Ekospray insulation can also be used inside the wall structure. In these wall structures the outdoor climate effects essentially for moisture transport. The details of these wall structures must be designed so that extra moisture can't be permeated in walls and wall structure must have ability to dry up.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella vuosien 2013 ja 2014 aikana. Työn ohjaajana ja valvojana on toiminut professori Juha Vinha, jota haluan kiittää työni järjestämisestä ja ohjauksesta. Kiitos myös muille rakennusfysiikkaryhmän tutkijoille neuvoista ja opastuksesta, sekä Kimmo Siivoselle Purfin Oy:stä, joka osaltaan on mahdollistanut kyseisen tutkimuksen.

Kiitos myös vaimolleni Sirpalle, joka kannustuksellaan ja tukemisellaan on mahdollistanut jatko-opintoni ja sen myötä myös tämän tutkimuksen tekemisen.

Tampereella 18.5.2014

Matti Kiljunen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA | 7 |
| 2.1 | Lämmön siirtyminen | 7 |
| 2.1.1 | Johtuminen | 7 |
| 2.1.2 | Konvektio | 9 |
| 2.1.3 | Säteily | 10 |
| 2.2 | Kosteuden siirtyminen | 17 |
| 2.2.1 | Diffuusio | 18 |
| 2.2.2 | Kapillaarivirtaus | 19 |
| 2.2.3 | Kosteuden konvektio | 22 |
| 3 | HOMEEN KASVU RAKENTEISSA | 24 |
| 3.1 | Homevauriot | 24 |
| 3.2 | Homeen kasvulle otolliset olosuhteet | 24 |
| 3.3 | Rakennusmateriaalien homehtumisriskin laskennallinen arviointi | 25 |
| 4 | LASKELMISSA KÄYTETYT SISÄ- JA ULKOILMAN OLOSUHTEET | 31 |
| 4.1 | Sisäilma | 31 |
| 4.2 | Ulkoilma | 32 |
| 4.2.1 | Ryömintätila | 33 |
| 4.2.2 | Maapohjan olosuhteet | 34 |
| 4.2.3 | Ilmansuunnat | 34 |
| 4.2.4 | Viistosade | 35 |
| 5 | LASKENTATARKASTELUJEN TOTEUTUS | 38 |
| 5.1 | Tutkimusmenetelmät | 38 |
| 5.2 | Tarkastelupisteiden ja raja-arvojen valintaperiaatteet | 39 |
| 6 | LASKENTATULOSTEN TARKASTELU | 40 |
| 6.1 | 70-luvun puurunkoisen pientalon tiiliverhottu ulkoseinä | 40 |
| 6.2 | 70-luvun puurunkoisen pientalon valesokkeli | 41 |
| 6.3 | Sisäpuolelta lisäeristetty pientalon hirsiseinä | 41 |
| 6.4 | Rintamamiestalon korjattu puurunkoinen ulkoseinä | 44 |
| 6.5 | Rintamamiestalon kellarin seinä | 48 |
| 6.6 | Korjattu 70-luvun betonisandwich-elementti seinä | 50 |
| 6.7 | 50-luvun paikalla valetun kerrostalon korjattu betoniseinä | 51 |
| 6.8 | 50-luvun paikalla valetun kerrostalon korjattu kellarinseinä | 53 |
| 6.9 | Sisäpuolelta lisäeristetty massiivitiiliseinä US10, 10.1 ja 10.2 | 54 |
| 6.4 | Rintamamiestalon korjattu puurunkoinen ulkoseinä | 44 |
| 6.11 | Hirsirunkoisen ryömintätilaisen pientalon ulkoseinän, perusmuurin, ja alapohjan liitos (Rakenne 2) | 59 |
| 6.12 | Ryömintätilaisen rintamamiestalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitos (Rakenne 3) | 62 |
| 6.13 | Kellarillisen rintamamiestalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 4) | 64 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.14 | 70-luvun ryömintätilaisen betonirunkoisen pienkerrostalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitos (Rakenne 5)..... | 66 |
| 6.15 | 50-luvun paikalla valetun kellarillisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 6)..... | 68 |
| 6.16 | 30-luvun kellarillisen massiivitiilirunkoisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 7)..... | 70 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 72 |

1 JOHDANTO

1.9.2013 voimaan tulleiden uusien energiamääräysten myötä rakenteiden lämmöneristävyyttä koskevat vaatimukset tiukkenivat ja sen myötä eristepaksuudet kasvavat aiheuttaen samalla haasteita ja ongelmia rakenteiden kosteustekniselle toimivuudelle. Uusia eristemateriaaleja kehitetään ja tutkitaan ongelmien ratkaisemiseksi. Korjausrakentamisessa eristämisen haastavuutta lisää osaltaan myös rakennuskohtaiset määräykset. Esimerkiksi ulkopuolelta suojeltujen julkisivurakenteiden lisäeristäminen joudutaan toteuttamaan sisäpuolelta, mikä saattaa aiheuttaa rakenteen kylmenemistä siinä määrin, että rakenteeseen muodostuu kastepiste.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ruiskutettavan Ekospray-polyuretaani eristeen lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta korjausrakentamisessa laskennallisin keinoin. Laskennallisissa tarkasteluissa pyrittiin selvittämään tyypillisten suomalaisten korjattavien pien- ja kerrostalojen ulkoseinien ja alapohjien ja niiden liitoskohtien homehtumis- ja kondensoitumisriskiä. Laskentatarkastelujen avulla pyrittiin myös löytämään ruiskutettavalla Ekospray-eristeellä toteutettavia lämpö- ja kosteusteknisesti toimivia rakenneratkaisuja korjausrakentamiseen. Tarkasteltavien rakenteiden eristepaksuudet suunniteltiin rakennusosakohtaisesti noudattaen uusia Suomen Rakentamismääräyskokoelman energiatehokkuuden parantamisesta asetettuja vaatimuksia korjausrakentamisessa [10].

Mitoittavina ulkoilman olosuhteina käytettiin kosteusteknisen toiminnan kannalta kriittisiä mitoitusolosuhteita, jotka on määritetty Tampereen teknillisessä yliopistossa aiemmin tehtyjen projektien yhteydessä [14]. Sisäilman lämpötilana laskennassa käytettiin 21 °C ja kosteuslisänä 5 g/m³ talviaikana ja 2 g/m³ kesäaikana [12].

Tutkimuksessa ei otettu huomioon mahdollisista rakennusvirheistä johtuvia lisäkosteusrasituksia eikä rakenteiden pinnoitteiden (tasoiitteet, maalit, tapetit) vaikutuksia. Laskennassa käytettävä Wufi 2D 3.3-ohjelma ei myöskään huomioi konvektion vaikutusta lämmön ja kosteuden siirtymisessä.

2 LÄMMÖN JA KOSTEUDEN SIIRTYMINEN RAKENTEISSA

2.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö on aineen molekyylien liike-energiaa. Lämpötilan noustessa liike-energia kasvaa. Lämmön siirtymistä voi tapahtua pääasiassa kolmella eri tavalla; johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Suurin osa rakenteissa tapahtuvasta lämmön siirtymisestä tapahtuu yleensä johtumalla. [1]

2.1.1 Johtuminen

Johtumalla tapahtuvassa lämmön siirtymisessä lämpö siirtyy materiaalin molekyylien aiheuttaman värähtelyn vaikutuksesta ilman, että molekyylien paikat vaihtuisivat. Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpöenergian liike tapahtuu johtumisessa aina korkeammasta lämpötilasta matalampaa lämpötilaa kohti [3]. Johtumalla siirtyvän lämpövirran tiheys, q , pinta-alayksikköä kohti (W/m^2) voidaan laskea homogeenisessa ja isotrooppisessa ainekerroksessa Fourierin lain avulla kaavalla [2]

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.1)$$

missä,

| | | |
|-----------|----|---|
| λ | on | lämmönjohtavuus (W/mK) |
| T | on | lämpötila (K) |
| x, y, z | on | lämpövirran suuntakoordinaatit (m) |

Lämmönjohtavuus on kokeellisesti määritelty materiaaliominaisuus, joka riippuu materiaalin kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Hygroskooppisilla materiaaleilla kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen on suurempi verrattuna ei-hygroskooppisiin aineisiin. Hygroskooppisuus tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä ja luovuttaa sitoutunutta kosteutta takaisin ilmaan, kun ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Aineiden hygroskooppisuutta kuvataan tasapainokosteus- eli sorptiokäyrillä. Käyrä ilmoittaa kuinka paljon kosteutta aine voi hygroskooppisesti sitoutuneena tasapainotilassa sisältää eri suhteellisissa kosteuksissa. [2]

Rakennusfysikaalisissa laskelmissa käytettävissä lämmönjohtavuusarvoissa on huokoisilla materiaaleilla otettu huomioon myös huokosilmassa tapahtuva säteily ja osittain

ilmahuokosissa tapahtuvan konvektion vaikutus. Eri osa-alueiden osuus lämmönjohtavuudesta vaihtelee materiaalin tiheyden mukaan. Epästationäärisessä tapauksessa lämpövirran tiheys ja lämpötilat voidaan määrittää eri ajan hetkinä kolmidimensioisen lämmön johtumisen energiataseyhtälön avulla [2]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q' \quad (2.2)$$

missä,

| | | |
|--------|----|---|
| ρ | on | materiaalin tiheys (kg/m^3) |
| c | on | materiaalin ominaislämpökapasiteetti (J/kgK) |
| t | on | aika (s) |
| q' | on | lämmönkehitys/lämpöhäviö (W/m^3) |

Materiaalin ominaislämpökapasiteetti, c , riippuu lämmönjohtavuuden tavoin materiaalin kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta. Termiä ρc ($\text{J/m}^3\text{K}$) kutsutaan tilavuuslämpökapasiteetiksi. Materiaalissa tapahtuva lämmönkehitys tai lämpöhäviö, q' (W/m^3), on kemiallisen reaktion aiheuttama, joka tapahtuu esimerkiksi betonin hydratoitumisen yhteydessä. Yhtälön 2.2 mukaan tarkasteltavaan pisteeseen tuleva ja siinä kehittyvä energiamäärä on yhtä suuri pisteestä lähtevän ja siihen varastoituneen energiamäärän kanssa. Lämmönjohtavuuden pysyessä vakiona lämpötilan muuttuessa, voidaan yhtälö kirjoittaa alla olevaan muotoon, jolloin yhtälöryhmälle saadaan lineaarinen ratkaisu [2]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q' \quad (2.3)$$

Materiaalin terminen diffusiviteetti, a (m^2/s), kertoo kuinka nopeasti lämpötilan muutokset tapahtuvat materiaalissa. Mitä suurempi on aineen terminen diffusiviteetti, sitä nopeammin se reagoi ympäristössä tapahtuviin lämpötilamuutoksiin ja saavuttaa terminen muutoksen jälkeisen tasapainotilan. Terminen diffusiviteetti voidaan määritellä kaavalla [2]

$$a = \frac{\lambda}{\rho_0 c_p} \quad (2.4)$$

missä,

| | | |
|----------|----|--|
| ρ_0 | on | materiaalin kuivatiheys (kg/m^3) |
| c_p | on | materiaalin ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (J/kgK) |

Yksidimensioisessa tapauksessa termistä diffusiviteettia käytettäessä energiataseyhtälö voidaan kirjoittaa muodossa [2]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \frac{q'}{\rho_0 c_p} \quad (2.5)$$

Veden faasimuutosenergiasta laskentaohjelmissa jätetään yleensä huomioimatta veden jäätyminen ja sulamisen aiheuttama faasimuutosenergia. Veden faasimuutoksista Wufi-2D-ohjelma huomioi laskennassa veden höyrystymislämmön, h_v (= 2500 kJ/kg). Lauhtuva vesihöyry luovuttaa ja höyrystyvä kosteus sitoo faasimuutosenergiaa. Kun veden höyrystymislämpö otetaan mukaan, voidaan energiataseyhtälö kirjoittaa yksidimensioisessa tapauksessa seuraavaan muotoon.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + h_v \delta_p \left(\frac{\partial^2 p_v}{\partial x^2} \right) + q' \quad (2.6)$$

missä,

| | | |
|------------|----|-------------------------------------|
| h_v | on | veden höyrystymislämpö (2500 kJ/kg) |
| δ_p | on | vesihöyrynläpäisevyys (kg/msPa) |
| p_v | on | vesihöyryyn osapaine (Pa) |

2.1.2 Konvektio

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana paine-eron vaikutuksesta. Paine-eroa voi aiheuttaa esimerkiksi tuuli (pakotettu konvektio) tai lämpötilaerojen aiheuttamat tiheyserot (luonnollinen konvektio). Rakennusfysiikassa tarkastellaan yleensä ilman konvektiota. Konvektiivinen lämpövirran tiheys, q_{conv} (W/m²), materiaalin pinnalta ympäröivään ilmaan, voidaan laskea Newtonin lain avulla alla olevan kaavan mukaan [2]

$$q_{conv} = \alpha_{conv} (T_s - T_a) \quad (2.7)$$

missä,

| | | |
|-----------------|----|---|
| α_{conv} | on | konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/m ² K) |
| T_s | on | pinnan lämpötila (K) |
| T_a | on | ilman lämpötila (K) |

Lämmönsiirtokerroimen arvo riippuu tarkasteltavan pinnan muodosta ja karheudesta, virtaavan aineen ominaisuuksista sekä virtauksen luonteesta, joka voi olla luonteeltaan laminaarista tai turbulentista. Huokoisilla lämmöneristeillä eristetyissä rakenteissa voi konvektiolla olla merkittävä vaikutus rakenteen läpi virtaavaan lämpömäärään. Riittävän paksuissa (≥ 200 mm) huokoisilla lämmöneristeillä tehdyissä seinä- ja yläpohjarakenteissa voi lisäksi tapahtua rakenteen sisäistä konvektiota, jonka vaikutusta ei ole huomioitu lämmöneristeen lämmönjohtavuuden arvossa. Sisäisessä konvektiossa rakenteen ulkopinnan lähellä oleva kylmä ilma pyrkii raskaampana alaspäin aiheuttaen sisäisen konvektiovirtauksen rakenteeseen [2]. Tässä tutkimuksessa käytetty Wufi-2D-

ohjelma ei ota laskennassa huomioon konvektion vaikutusta rakenteessa tai rakenteen läpi. Toisaalta tässä tutkimuksessa tarkastelluissa rakenteissa sisäisellä konvektiolla ei ole merkitystä polyuretaanieristeessä, johtuen Ekospray-eristeen umpisolurakenteesta. Pintojen lämmönsiirtokertoimina on käytetty alapohja- ja ulkoseinärakenteissa RakMk:n osassa C4 annettujen sisä- ja ulkopintojen lämmönvastusten (R_{si} ja R_{se}) käänteisarvoja, joissa on mukana sekä säteilyn, että konvektion vaikutus.

Rakenteiden ulkopuolisen maanpinnan lämmönsiirtokertoimena on käytetty tässä tutkimuksessa $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

2.1.3 Säteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on $0,1 - 100 \text{ }\mu\text{m}$. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella emittoivat säteilyä [1]. Säteilylämmönsiirto ei vaadi erillistä väliainetta, vaan väliaine voi päinvastoin hidastaa lämmönsiirtymistä eri pintojen välillä. Rakennusfysikaalisessa tarkastelussa lämpösäteily jaetaan lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Auringonsäteily voi olla suoraa tai ilmakehästä ja pilvistä heijastuvaa diffuusia säteilyä. Pinnan emittoimaa lämpösäteilyä kuvataan suureella E . Pinnan emittoimalla säteilyteholla on yläraja, joka voidaan laskea kaavalla [2]

$$E = \sigma T_s^4 \quad (2.8)$$

missä,

| | | |
|----------|----|--|
| σ | on | Stefan-Bolzmännin vakio ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$) |
| T_s | on | säteilyä lähettävän pinnan lämpötila (K) |

Kaavalla 2.8 laskettava säteilyteho vastaa ideaalisen mustan kappaleen lähettämää säteilytehoa, E_b , jota käytännön rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa vastaa ainoastaan auringon lähettämä säteily. Muiden pintojen ja ideaalisen mustan kappaleen välinen säteilyteho ilmoitetaan alla olevan kaavan 2.9 mukaisesti emissiviteetin, ε , avulla, joka vaihtelee välillä $0 - 1$ [2].

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.9)$$

Emissiviteetin avulla ilmaistuna pinnan lähettämä säteilyteho saadaan Planckin lain mukaan kaavasta [2]

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.10)$$

Alla olevassa taulukossa 2.1 on annettu emissiviteetin arvoja huonelämpötilassa eri rakennusmateriaaleille. Taulukosta havaitaan, että useimpien rakennusmateriaalien emis-

siviteetti asettuu huoneen lämmössä välille 0,8 – 0,95. Poikkeuksen tekee alumiini, jonka emissiviteetin arvot asettuvat välille 0,09 – 0,62.

Taulukko 2.1. Materiaalien emissiviteettejä. [1]

| Materiaali | Emissiviteetti (ε) |
|-------------------|--------------------|
| Alumiini | |
| - kirkas | 0,09 |
| - oksidoitunut | 0,20-0,33 |
| Betoni, karhea | 0,94 |
| Kattohuopa | 0,92 - 0,94 |
| Lasi | 0,94 |
| Maalit, lakat | |
| - alumiiniväri | 0,27 - 0,62 |
| - musta maali | 0,8 - 0,97 |
| - valkoinen maali | 0,9 - 0,97 |
| Puu | 0,8 - 0,9 |
| Poltettu tiili | 0,91 - 0,93 |
| Kalkkiehkekatiili | 0,9 |

Säteilyn kohdatessa pinnan, osa siitä heijastuu, osa absorboituu ja osa menee pinnan läpi. Tasapainotilassa pintaan tuleva ja siitä lähtevä säteily ovat yhtä suuria. Heijastuneen säteilyn suhdetta pintaan tulevaan säteilyyn kuvataan heijastuskertoimella ρ . Absorboitunutta säteilyä kuvataan absorptiokertoimella, α , ja pinnan läpäissyttä säteilyä läpäisykerroin τ . Näiden välinen suhde voidaan esittää kaavalla [2]

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.11)$$

Rakennusfysikaalisissa ilmiöissä pintoja tarkastellaan tavallisesti harmaina pintoina, jolloin Kirchhoffin lain mukaan tietyssä lämpötilassa olevan kappaleen emissiviteetti, ϵ , on yhtä suuri, kuin pintaan tulevan, samassa lämpötilassa olevasta mustasta kappaleesta lähtöisin oleva absorptiokerroin α . Läpäisemättömillä pinnoilla läpäisykerroin $\tau = 0$, jolloin pinnan heijastuskerroin saadaan laskettua kaavasta [2]

$$\rho = 1 - \alpha \quad (2.12)$$

Absorptiokerroin on erilainen lyhyt- ja pitkäaaltoiselle säteilylle ja lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokerroin, α_{sol} , saattaa erota merkittävästi pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokertoimesta α [2]. Alla olevassa taulukossa 2.2 on lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokertoimia eri rakennusmateriaaleille.

Taulukko 2.1. Lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokertoimia α_{sol} eri materiaaleille. [18]

| Materiaali | Absorptiokerroin (α_{sol}) |
|-----------------------|--|
| Rappaus, valkoinen | 0,4 |
| Kattotiili | |
| - punainen | 0,6 |
| - ruskea | 0,8 |
| Kattohuopa | 0,9 |
| Puu (kuusi) | 0,94 |
| - käsittelemätön | 0,4 |
| - sään harmaannuttama | 0,7 |
| - maalattu ruskea | 0,8 |
| Tiili, punainen | 0,7 |

Auringon säteilystä ilmakehän ulko-osiin tulevaa säteilyä kutsutaan aurinkovakioksi ja sitä merkitään suurella $I_{sol,0}$ ($\approx 1340 \text{ W/m}^2$). Maassa auringonsäteitä vastaan kohtisuoralle pinnalle tulevan säteilyn teho I_{sol} (W/m^2) saadaan kaavasta

$$I_{sol} = I_{sol,0} * \tau^m \quad (2.13)$$

missä,

τ on ilmakehän läpäisykerroin (-)
 m on suhteellinen läpäisymassa (= säteen ilmakehässä kulkeman matkan suhde lyhimpään mahdolliseen matkaan)

Ilmakehän läpäisykerroin τ vaihtelee välillä 0,62 (pilvinen sää) – 0,81 (aurinkoinen sää). Suhteellinen läpäisymassa saadaan laskettua kaavasta

$$m = \frac{1}{\cos(90^\circ - \beta)} \quad (2.14)$$

missä,

β on auringon korkeuskulma ($^\circ$)

Säteilyteho $I_{sol,N}$ (W/m^2) kohtisuoraan tarkasteltavaa pintaa vasten saadaan kaavasta

$$I_{sol,N} = I_{sol} * \cos \nu \quad (2.15)$$

missä,

ν on tarkasteltavan pinnan normaalin ja säteitä vastaan kohtisuoran pinnan normaalin välinen kulma ($^{\circ}$)

Ilmakehästä tarkasteltavaan pintaan tuleva säteilyteho I_{atm} (W/m^2) saadaan kaavasta

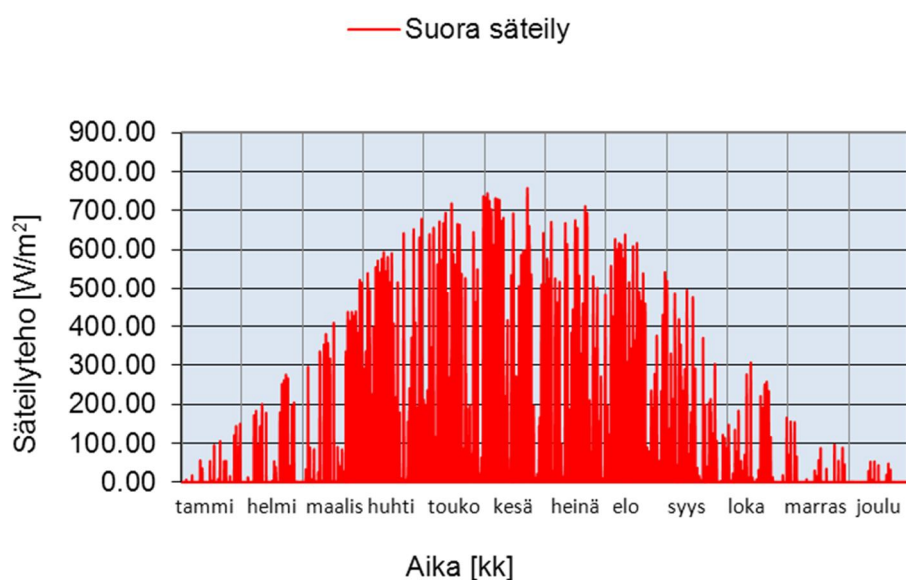
$$I_{atm} = I_{sol,N} + I_D + I_{sky} \quad (2.16)$$

missä,

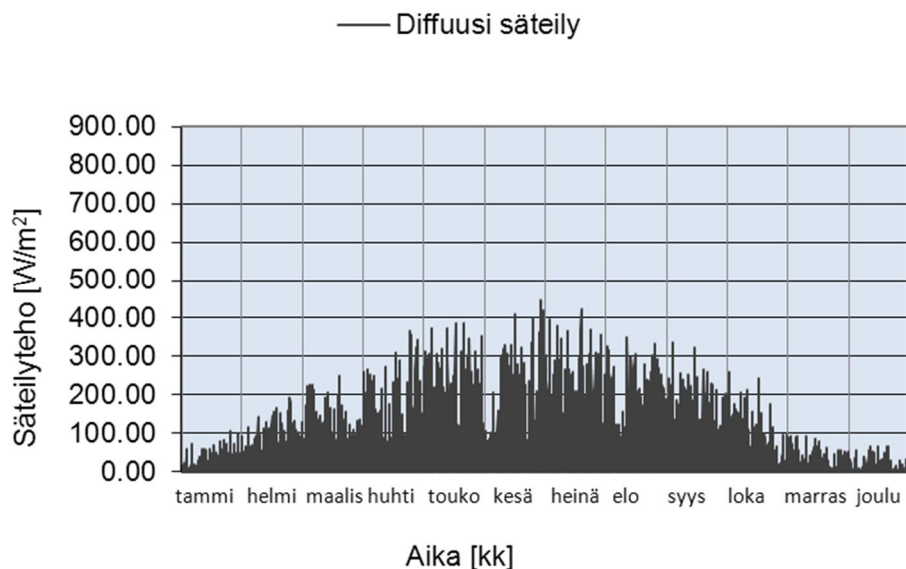
I_D on pintaan tuleva diffuusi säteily (lyhytaaltainen hajasäteily) (W/m^2)
 I_{sky} on pintaan tuleva taivaan vastasäteily (pitkäaaltainen säteily) (W/m^2)

Pinnan kaltevuuden lisäksi auringon säteilytehoon tarkasteltavalle pinnalle vaikuttaa leveysaste, kellonaika, ilmansuunta ja vuodenaika.[15]

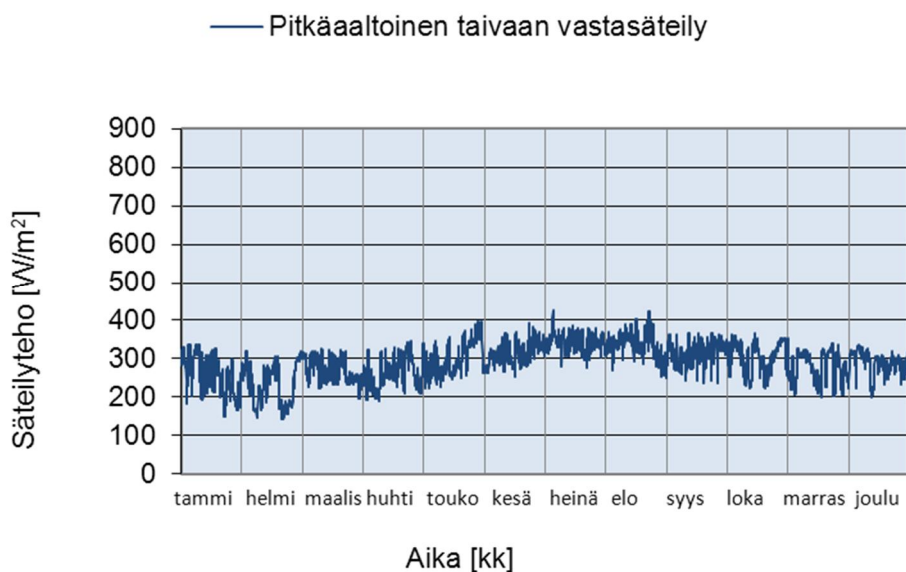
Kuvissa 2.1 ja 2.2 näkyy esimerkki lyhytaaltoisen suoran säteilyn ja diffuusin säteilyn tehosta (W/m^2) maanpinnalla ja kuvassa 2.3 pitkäaaltoisen taivaan vastasäteilyn tehosta (W/m^2) maanpinnalla. Kuvien säteily tehot ovat Vantaan 2007 ilmastodatasta Helsinki-Vantaan mittausasemalta [5]. Ilmatieteenlaitoksen tekemien tutkimusten mukaan erityisesti matalilla auringon korkeuskulmilla kokonaissäteilyn ollessa vähäistä tulee lähes kaikki auringon säteily diffuusina säteilynä. Kokonaissäteilyn kasvaessa hajasäteilyn osuus pienenee ja suurin osa säteilystä tulee suorana säteilynä.



Kuva 2.1. Auringon suoran säteilyn teho maanpinnalla Helsinki-Vantaan mittausasemalla 2007.



Kuva 2.2. Auringon diffuusin säteilyn teho maanpinnalla Helsinki-Vantaan mittausasemalla 2007.



Kuva 2.3. Taivaalta tulevan vastasäteilyn teho Helsinki-Vantaan mittausasemalla 2007.

Ilmakehästä tulevan säteilyn lisäksi pintaan tulee pitkäaaltoista säteilyä lähellä olevista rakennuksista, maasta ja puista. Näiden pintalämpötilat ovat yleensä lähes samoja, kuin tarkasteltavan ulkopinnan, jolloin nettosäteily näiden pintojen välillä on vähäinen. Seinärakenteita tarkasteltaessa näiden pintojen osuus vaikuttaa kuitenkin siihen, kuinka suuri on seinän näkyvyyskerroin F taivaalle. Perustapauksessa oletetaan seinän näkyvyyskerroimen taivaalle olevan 0,5 ja maahan ja ympäröiviin rakennuksiin 0,5. Tarkasteltavaan pintaan tuleva taivaan vastasäteily voidaan laskea kaavasta

$$I_{sky} = 5,67 * \left(\frac{T_{sky}}{100}\right)^4 * f(p_v) * k_{clouds} \quad (2.17)$$

missä,

T_{sky} on taivaan tehollinen lämpötila (K)
 k_{clouds} on pilvisyysskerroin (-)

Taivaan tehollisen lämpötilan T_{sky} arvo riippuu pilvisyydestä ja vuorokaudenajasta. Lämpötila T_{sky} voidaan laskea alla olevilla kaavoilla (2.18 - 2.20).

Pystypinnat, kirkas sää:

$$T_{sky} = 1,1 * T_e - 5 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.18)$$

Pystypintojen kaavassa on otettu huomioon se, että seinärakenteissa näkyvyyskerroin taivaalle on pienempi kuin vaakarakenteissa.

Vaakapinnat, kirkas sää:

$$T_{sky} = 1,2 * T_e - 14 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.19)$$

Pysty- ja vaakapinnat, päivä tai pilvinen sää:

$$T_{sky} = T_e \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (2.20)$$

missä,

T_e on ulkoilman lämpötila ($^\circ\text{C}$)

Funktio $f(p_v)$ saadaan laskettua kaavasta

$$f(p_v) = a - b * 10^{cp_v} \quad (2.21)$$

missä,

a on 0,79
b on 0,254
c on 0,00052
 p_v on vesihöyryn osapaine (Pa)

Pilvisyysskerroin k_{clouds} riippuu sumuisuuden/pilvisyyden määrästä ja korkeudesta. Pilvisyysskerroin löytyy valmiiksi taulukoituja arvoja. Rakennuksien ulkovaippoja tarkasteltaessa pintaan tulevan lämpösäteilyn lisäksi pintojen lämpötiloihin vaikuttaa pinnasta ympäröivään ulkoilmaan säteilevä lämpö. Pilvettöminä öinä lämpimämmästä ulkopinnasta kylmempään ulkoilmaan säteilevä lämpösäteily voi olla suurempi, kuin pin-

taan tuleva lämpösäteily. Tämän seurauksena pinnan lämpötila laskee ulkoilman lämpötilaa alhaisemmaksi. Kyseessä on kuitenkin tavallisesti lyhytkestoinen olosuhdemuutos yön vaihtuessa päiväksi. Lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn lisäksi pinnan lämpötilaan vaikuttaa konvektio ja pinnalla tapahtuvat kosteuden faasimuutokset.

Nettosäteilyn lämpövirran tiheys q_{rad} (W/m^2) materiaalin pinnalta ympäröivään ilmaan voidaan laskea kaavalla [15]

$$q_{rad} = \alpha_{rad,e} * (T_s - T_a) \quad (2.22)$$

missä,

| | | |
|----------------|----|---|
| α_{rad} | on | tarkasteltavan pinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/m^2K) |
| T_s | on | tarkasteltavan pinnan lämpötila ($^{\circ}C$, K) |
| T_a | on | ympäröivien pintojen lämpötila ($^{\circ}C$, K) |

Pinnan lähellä olevalle ilmalle voidaan laskea ekvivalentti lämpötila T_{ekv} ($^{\circ}C$, K), jota hyvin eristetyissä vaipparakenteissa voidaan käyttää suoraan ulkopinnan lämpötilana. Stationääritilassa ekvivalentti lämpötila voidaan laskea kaavalla

$$T_{ekv} = T_e + \frac{1}{\alpha_e} * [\alpha_{sol} * I_{sol,N+D} + g * h_v + (T_{sky} - T_e) * \alpha_{rad,e}] \quad (2.23)$$

missä,

| | | |
|------------------|----|---|
| T_e | on | ulkoilman lämpötila ($^{\circ}C$) |
| α_e | on | ulkopinnan lämmönsiirtokerroin (W/m^2K) (sisältää sekä konvektion että säteilyn lämmönsiirtokertoimet) |
| α_{sol} | on | lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptiokerroin (-) |
| $I_{sol,N+D}$ | on | ulkopintaan absorboituneen suoran ja diffuusin auringonsäteilyn summa (W/m^2) |
| g | on | pintaan kondensoituvan kosteusvirran tiheys (kg/m^2s) |
| h_v | on | veden höyrystymislämpö (2500 kJ/kg) |
| T_{sky} | on | taivaan tehollinen lämpötila (K), joka lasketaan kaavoista 2.18 - 2.20 |
| $\alpha_{rad,e}$ | on | ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtokerroin (W/m^2K) |

Ulkopinnan lämmönsiirtokerroin $\alpha_{rad,e}$, voidaan laskea kaavalla

$$\alpha_{rad,e} = 4 * \varepsilon_{12} * \sigma * \left(\frac{T_{se} + T_{sky}}{2} \right)^3 \quad (2.24)$$

missä,

| | | |
|--------------------|----|---|
| ε_{12} | on | ulkopinnan ja taivaan välinen yhdistetty emissiviteetti (-) |
| T_{se} | on | vaipan ulkopinnan lämpötila (K) |

Ulkopinnan ja taivaan yhdistetty emissiviteetti voidaan laskea kaavalla

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} * \frac{A_1}{A_2} \quad (2.25)$$

missä,

| | | |
|-----------------|----|-------------------------------|
| ε_1 | on | ulkopinnan emissiviteetti (-) |
| ε_2 | on | taivaan emissiviteetti (-) |
| A_1 | on | ulkopinnan pinta-ala |
| A_2 | on | taivaan pinta-ala |

2.2 Kosteuden siirtyminen

Kosteuden siirtymisestä rakenteissa tai rakenteisiin suurimman osan muodostavat painovoiman aiheuttama kosteuden siirtyminen (ulkona sadevesi, sisällä pesuvesi) ja kapillaarinen kosteuden siirtyminen (maaperästä perustuksiin ja alapohjarakenteisiin siirtyvä kosteus). Painovoimaisen ja kapillaarisen kosteuden siirtymisen lisäksi merkittäviä kosteuden siirtymismuotoja ovat vesihöyryn konvektio ja diffuusio. Wufi-2D ohjelmassa kosteuden siirtymismuodoista rakenteissa ja niiden sisällä huomioidaan kapillaarinen kosteuden siirtyminen sekä kaasudiffuusio. Materiaalien pintojen lämmön- ja kosteudensiirtokertoimien arvoissa on mukana myös konvektion vaikutus. Kosteuden siirtymistä rakennuksien vaipparakenteissa voi tapahtua eri suuntiin, johtuen rakenteen yli vallitsevista lämpötilaeroista. Vesihöyryndiffuusio voi tapahtua eri suuntaan kuin pinta-diffuusio ja kapillaarinen kosteuden siirtyminen.[15]

Rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta on olennaista estää kosteuden pääsy rakenteisiin ja toisaalta varmistaa rakenteiden riittävä kuivumiskyky. Rakennusten ulkovaippojen kosteustekniseen toimintaan vaikuttavat ulko- ja sisäilman olosuhteet, rakennusaikainen kosteusrasitus ja rakennusmateriaalien kosteudensietokyky. Materiaalit pyrkivät sitomaan (adsorpoimaan) kosteutta ilmasta tai luovuttamaan (desorpoimaan) sitä ilmaan. Sitoessaan tai luovuttaessaan kosteutta materiaalit pyrkivät saavuttamaan tasapainokosteuden, jossa niiden sisältämä kosteuspitoisuus, w (kg/m^3), vastaa ilman suhteellista kosteutta. Tätä ominaisuutta kutsutaan hygroskooppisuudeksi [1]. Materiaalin tasapainokosteus on erilainen riippuen siitä, lähestytäänkö tasapainokosteutta kuivemmasta vai kosteammasta kosteuspitoisuudesta. Tätä ilmiötä kutsutaan hystereesiksi. Suhteellinen kosteus, RH (%), kertoo kuinka paljon huokosilmassa on vesihöyryä verrattuna huokosilman kyllästyskosteuspitoisuuteen. Suhteellinen kosteus, φ (%), voidaan laskea kaavalla [1]

$$\varphi = 100 * \frac{v}{v_{sat}} \quad (2.26)$$

missä,

| | | |
|------------------|----|--|
| φ | on | huokosilman suhteellinen kosteus (%) |
| v | on | huokosilman vesihöyrypitoisuus (g/m^3) |
| v_{sat} | on | huokosilman kyllästyskosteuspitoisuus (g/m^3) |

Saavutettuaan hygrooskooppisen kyllästyskosteuksen, w_{hygr} , joka vastaa n. 98 % suhteellista kosteutta, diffuusiolla tapahtuva kosteuden siirtyminen materiaalissa vähenee ja siirrytään kapillaariselle alueelle. Materiaalin kosteuspitoisuuden ylittäessä kriittisen kosteuspitoisuuden, w_{krit} (kg/m^3), alkaa pääosa kosteuden siirtymisestä tapahtua nesteenä kapillaarisesti [1]. Materiaalin tasapainokosteus riippuu suhteellisen kosteuden lisäksi lämpötilasta ollen suurimmillaan 0 °C lämpötilassa. Lämpötila vaikuttaa myös kosteuden kondensoitumiseen. Lämpötilan laskiessa ja vesihöyrypitoisuuden pysyessä muuttumattomana huokosilman suhteellinen kosteus nousee. Suhteellisen kosteuden noustua 100 %:iin, alkaa vesihöyry tiivistyä vedeksi eli kondensoitua [1].

2.2.1 Diffuusio

Diffuusio on kaasumolekyylien liikettä, jonka seurauksena yksittäisen kaasun pitoisuuserot pyrkivät tasoittumaan korkeammasta kaasupitoisuudesta matalampaan kaasupitoisuuteen. Kosteuden siirtymisessä rakenteissa puhutaan vesihöyryn diffuusiosta. Homogeenisessä ainekerroksessa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran tiheys, g_v ($\text{kg/m}^2\text{s}$), voidaan laskea Fickin (Adolf Fick, Saksa 1855) lain avulla alla olevalla kaavalla

$$g_v = -\delta_v * \nabla v = -\left(\delta_v \frac{\partial v}{\partial x}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial y}, \delta_v \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad (2.27)$$

missä,

| | | |
|------------|----|---|
| δ_v | on | materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrynpitoisuuseron avulla ilmaistuna (m^2/s) |
| x, y, z | on | kosteusvirran suuntakoordinaatit |

Vesihöyrynläpäisevyys voidaan ilmoittaa myös vesihöyryn osapaine-eron avulla lasketuna termillä δ_p (kg/msPa). Eri tavoin ilmoitettujen vesihöyrynläpäisevyyksien välille saadaan ideaalikaasun tilanyhtälön avulla yhtälö [2]

$$\delta_v = \frac{R(273,15+\theta)}{M_w} * \delta_p \quad (2.28)$$

missä,

| | | |
|------------|----|--|
| R | on | yleinen kaasuvakio (8314,3 J/kmolK) |
| θ | on | lämpötila (°C) |
| M_w | on | veden moolimassa (18,02 kg/kmol) |
| δ_p | on | materiaalin vesihöyrynläpäisevyys vesihöyryn osapaine-eron |

avulla ilmaistuna (kg/msPa)

Wufi 2D-ohjelmassa materiaalin vesihöyrynläpäisevyys otetaan huomioon vesihöyrynläpäisevyyden, μ (-), avulla. Vesihöyrynläpäisevyyden kerroin kuvaa, kuinka paljon suurempi materiaalin diffuusivastus on verrattuna saman paksuiseen ilmakerrokseen samassa lämpötilassa. Ilman vesihöyrynläpäisevyyden kerroin $\mu=1$. Diffuusivastuskerroin voidaan laskea esimerkiksi vesihöyrynläpäisevyyden avulla kaavalla

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p} \quad (2.29)$$

missä,

δ_a on ilman vesihöyrynläpäisevyys vesihöyrypitoisuuden avulla ilmoitettuna (kg/msPa)

Ilman vesihöyrynläpäisevyys D_a (m²/s), voidaan laskea kaavalla

$$D_a = (22,2 + 0,14 * \theta) * 10^{-6} \quad (2.30)$$

Wufi-2D ohjelma laskee pinnasta ilmaan tai ilmasta pintaan diffuusiona siirtyvän kosteusvirran tiheyden, g_v (kg/m²s), ympäröivän ilman ja pinnan vesihöyrynläpäisevyyden osapaine-eron avulla kaavalla [18]

$$g_v = \beta * (p_s - p_a) \quad (2.31)$$

missä,

β on tarkasteltavan pinnan kosteudensiirtokerroin (kg/m²sPa)
 p_a on ympäröivän ilman vesihöyrynläpäisevyyden osapaine (Pa)
 p_s on vesihöyrynläpäisevyyden osapaine tarkasteltavan materiaalin pinnalla (Pa)

Sisä- ja ulkopinnoille Wufi-2D ohjelma laskee kosteudensiirtokerroin tarkasteltavan pinnan konvektiivisen lämmönsiirtokerroin α_{conv} avulla kaavalla [18]

$$\beta = 7 * 10^{-9} * \alpha_{conv} \quad (2.32)$$

2.2.2 Kapillaarivirtaus

Kapillaarista kosteuden siirtymistä voi tapahtua materiaalissa sen ollessa suoraan kosketuksissa veden kanssa tai sen kosteuspitoisuuden ollessa muutoin riittävän suuri. Raken-tamisessa puhutaan tavallisesti maasta tapahtuvasta kapillaarisesta kosteuden noususta perustus- ja alapohjarakenteisiin. Kapillaarista virtausta tapahtuu kuitenkin myös vaa-

kasuuntaan ja alaspäin. Rakenteiden kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi ulkoseiniin viistosateesta tuleva kosteusrasitus, joka voi siirtyä seinärakenteen sisäosiin kapillaarisesti, sekä joissakin tapauksissa myös diffuusiolla. Kapillaarinen virtaus tapahtuu materiaalin huokosiin syntyvän huokosalipaineen vaikutuksesta. Huokosalipaineella tarkoitetaan materiaalin huokosessa olevan vedenpinnan ja ilman välille syntyvää paine-eroa. Vesi pyrkii siirtymään huokosputkessa veden koheesion (koheesio = veden sisäinen vetovoima) ja veden pinnan ja materiaalin huokosseinämän välisen adheesion (adheesio = veden ja huokosseinämän välinen vetovoima) avulla. Veden pinta kaareutuu ja siihen syntyy jännitys. Syntyvän jännityksen seurauksena muodostuu paine-ero vedenpinnan ja ilman välille. Mitä pienempi on huokosen säde, sitä suuremmaksi huokosalipaine muodostuu ja sitä pienemmässä huokosilman kosteuspitoisuudessa voi tapahtua kapillaarista kosteuden siirtymistä [3]. Tavallisimmin materiaalissa tapahtuu kapillaarista virtausta suhteellisen kosteuden ollessa 98 – 100 % RH alueella. Materiaalin huokosilman suhteellisen kosteuden, ϕ , ja huokosalipaineen, s (Pa), yhteys voidaan laskea Thomsonin kaavalla [2]

$$\ln\phi = -\frac{sM_w}{\rho_wRT} \quad (2.33)$$

Tasapainotilanteessa huokosalipaine, s , voidaan laskea kaavalla [2]

$$s = \frac{2\sigma}{r} \cos\phi \quad (2.34)$$

missä,

| | | |
|----------|----|---|
| σ | on | huokosputken reunalla vettä ylöspäin nostava pintajännitys (0,073 N/m, 20 °C lämpötilassa) |
| r | on | huokosputken säde (m) |
| ϕ | on | vedenpinnan meniskuksen ja putken reunaman välinen kulma (°) (0° < ϕ < 90°) |

Alhaalta ylöspäin tapahtuvassa kapillaarisessa siirtymisessä saavutetaan tasapainotilanne silloin, kun huokosalipaine on nostanut veden huokosputkessa tasolle, jossa vesipatjaaseen kohdistuu huokosalipainetta vastaava veden hydrostaattinen paine. Kapillaarisen kosteusvirran tiheys, g_{cap} (kg/m²s), voidaan määrittää materiaalin kosteusdiffusiviteetin, D_{ws} (m²/s), avulla kaavalla [2]

$$g_{cap} = -D_{ws} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.35)$$

Kosteusdiffusiviteetti, D_{ws} , kuvaa sitä muutosnopeutta, jossa materiaalin kosteuspitoisuus saavuttaa uuden tasapainotilan ulkopuolen suhteellisen kosteuden muutoksen jälkeen. Kosteusdiffusiviteetin arvossa on mukana kaikkien kosteuden siirtymismuotojen vaikutus. Mitä suurempi on kosteusdiffusiviteetin arvo, sitä nopeammin se saavuttaa

muutoksen jälkeisen tasapainotilan. Wufi-2D ohjelma käyttää kapillaarisenvirtauksen siirtopotentiaalina suhteellista kosteutta, jolloin kapillaarisen kosteusvirran tiheys, g_{cap} ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), määritetään kaavalla [18]

$$g_{cap} = -D_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.36)$$

missä,

D_{φ} on materiaalin vedenjohtavuuskerroin (kg/ms)

Useimmille mineraalipohjaisille materiaaleille, kuten tässä tutkimuksessa käytetylle hiekkaiselle soralle, voidaan kosteusdiffusiviteetti, D_{ws} , määrittää likimääräisesti Wufi-2D ohjelmassa annetulla kaavalla [18]

$$D_{ws} \approx \left(\frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 * 1000^{\frac{w}{w_{cap}} - 1} \quad (2.37)$$

missä,

A_w on kapillariteettikerroin ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$)

w on materiaalin kosteuspitoisuus (kg/m^3)

w_{cap} on materiaalin kapillaarinen kyllästyskosteuspitoisuus (kg/m^3)

Kaavassa 2.36 esiintyvän kapillariteettikertoimen, A_w , avulla voidaan laskea kapillaarisen kosteusvirran tiheyden maksimiarvo materiaalin ollessa kosketuksessa kapillaarista kyllästyskosteutta vastaavaan kosteustilaan. Kapillaarisen kosteusvirran tiheys saadaan tällöin kaavalla

$$g_{cap} = \frac{A_w}{2\sqrt{t}} \quad (2.38)$$

missä,

t on aika (s)

Wufi-2D ohjelmassa otetaan huomioon myös kosteuden uudelleenjakaantuminen, D_{ww} (m^2/s). Kun varsinainen kapillaarinen kosteuden siirtyminen materiaalissa on päättynyt, jatkuu kapillaarinen kosteuden liike materiaalissa kosteuden pyrkiessä jakaantumaan tasaisesti. Tätä kutsutaan kosteuden uudelleen jakaantumiseksi. Kosteuden uudelleenjakaantumisen arvona voidaan käyttää kymmenesosaa kosteusdiffusiviteetin arvosta. Wufi-2D ohjelma käyttää laskennassa kosteusdiffusiviteettiä, D_{ws} , sateen aikana, mutta vaihtaa sen kosteusdiffusiviteetin uudelleen jakaantumiseen, D_{ww} , heti sateen päätyttyä.

2.2.3 Kosteuden konvektio

Konvektiossa vesihöyry siirtyy paine-eron vaikutuksesta syntyvän ilmavirran mukana huokoisessa materiaalisissa tai rakenteessa olevan raon tai reiän läpi. Käytännössä materiaalin läpi tapahtuvaa konvektiota suurempi merkitys on rakojen ja reikien kautta tapahtuvalla kosteuden konvektiolla [1]. Rakenteen ulkopintaan asennettavalla tuulensuojalla ja sisäpintaan asennettavalla ilmansululla voidaan estää vaipparakenteiden läpi tapahtuva kosteuden konvektio. Rakenteessa olevan reiän tai raon kautta konvektiolla tapahtuva kosteusvirta G_{conv} (kg/s) voidaan laskea kaavalla [2]

$$G_{conv} = R_a * (v_1 - v_2) \quad (2.39)$$

missä,

| | | |
|------------|----|--|
| R_a | on | ilman tilavuusvirta (m^3/s) |
| v_1, v_2 | on | vesihöyrypitoisuudet rakenteen eri puolilla (kg/m^3) |

Tilanteessa, jossa rakenteen sisä- ja ulkopuolen välillä vallitsee lämpötilaero ja virtaus tapahtuu sisältä ulos kosteuspitoisuuden ollessa sisällä suurempi, lisääntyy kosteuspitoisuus rakenteessa. Tällöin kosteuspitoisuus saattaa ylittää kyllästyskosteuspitoisuuden rakenteen ulkopinnassa ja tapahtuu kosteuden kondensoitumista. Virtauksen ollessa päinvastainen, saattaa sillä olla puolestaan rakennetta kuivattava vaikutus, jos ulkoilman vesihöyrypitoisuus on pienempi, kuin rakenteen sisäosassa olevan ilman vesihöyrypitoisuus [2]. Tuulettuvissa ulkoseinärakenteissa ulkoverhouksen ja tuulensuojarakenteen välissä oleva ilma voi olla kuivempaa tai kosteampaa, kuin ulkoilma. Tuuletusväliin voi tulla ylimääräistä kosteutta esimerkiksi diffuusiolla rakenteesta. Tuuletusvälin vesihöyrypitoisuus, $v(x)$ (kg/m^3), eri etäisyyksillä ilman sisääntuloaukosta voidaan laskea kaavalla [2]

$$v(x) = v_0 + (v_{in} - v_0) * e^{-x/l_{cv}} \quad (2.40)$$

missä,

| | | |
|----------|----|--|
| v_0 | on | tuuletusvälin keskimääräinen vesihöyrypitoisuus kaukana ilman sisääntuloaukosta, kun tuuletusvälissä ei ole ilmavirtausta (kg/m^3) |
| v_{in} | on | tuuletusväliin tulevan ilman vesihöyrypitoisuus (kg/m^3) |
| x | on | etäisyys ilman sisääntuloaukosta (m) |
| l_{cv} | on | karakteristinen pituus (m) |

Tuuletusvälin keskimääräinen vesihöyrypitoisuus, v_0 , voidaan määrittää pintojen vesihöyrypitoisuuksien ja kosteudensiirtokertoimien avulla kaavalla

$$v_0 = \frac{\beta_+ * v_+ + \beta_- * v_-}{\beta_+ + \beta_-} \quad (2.41)$$

missä,

| | | |
|-----------|----|--|
| β_+ | on | lämpimämmän pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s) |
| β_- | on | kylmemmän pinnan kosteudensiirtokerroin (m/s) |
| v_+ | on | lämpimämmän pinnan vesihöyrypitoisuus (kg/m ³) |
| v_- | on | kylmemmän pinnan vesihöyrypitoisuus (kg/m ³) |

Karakteristinen pituus, l_{cv} , voidaan laskea kaavalla

$$l_{cv} = \frac{\dot{M}_a / \rho_a}{B(\beta_+ + \beta_-)} \quad (2.42)$$

missä,

| | | |
|-------------|----|---|
| \dot{M}_a | on | ilman massavirta tuuletusvälissä (kg/s) |
| B | on | tuuletusvälin leveys sivusuunnassa |

Jos tuuletusvälin pituudeksi ajatellaan L, voidaan termillä, L/l_{cv} , kuvata sitä kohtaa tuuletusvälissä, jossa tuuletusväliin virtaava ilma ei enää vaikuta tuuletusvälissä olevan ilman keskimääräiseen vesihöyrypitoisuuteen v_0 . [15]

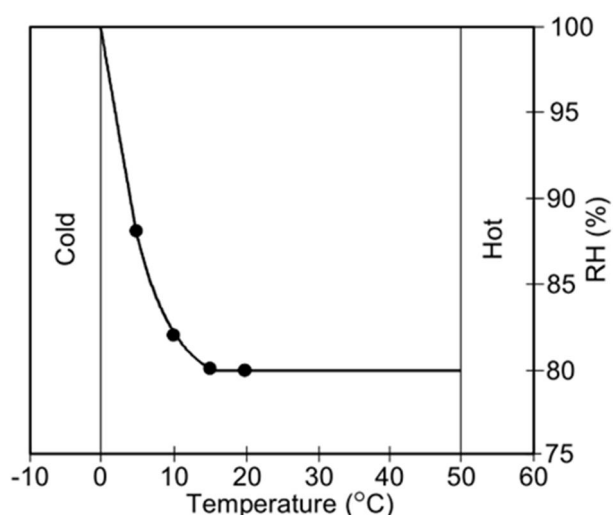
3 HOMEEN KASVU RAKENTEISSA

3.1 Homevauriot

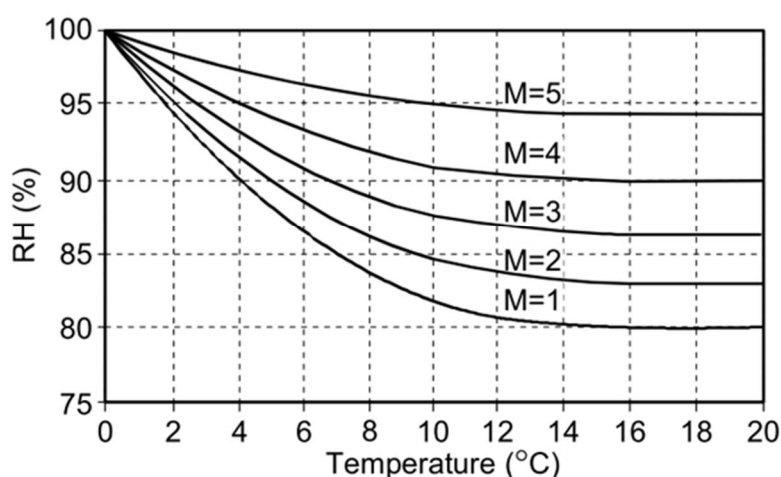
Rakennuksissa esiintyvät homeongelmat ovat seurausta kosteusrasituksesta, joka ylittää rakenteiden sietorajan. Erityisen herkkiä homeen kasvuille ovat puupohjaiset materiaalit, joissa homeen kasvu on mahdollista jo suhteellisen kosteuden ollessa 80 % RH. Sisäilmassa olevat homeitiöt ja homeiden aineenvaihduntatuotteet aiheuttavat usein ihmisille terveysongelmia ja riittävän pitkälle edetessään home- ja lahottajasienet saattavat aiheuttaa myös kantavien rakenteiden heikentymistä. Toisaalta ulkoilma sisältää varsinkin syksyisin suuren määrän homeitiöitä, jotka saattavat päästä sisäilmaan esimerkiksi tuuletuksen kautta. Siten pelkkä sisäilmatutkimuksessa paljastunut homeitiöiden esiintyminen ei ole välttämättä merkki kosteus- ja homevauriosta. Tässä tutkimuksessa keskitytäänkin tutkimaan rakenteista niitä osia, joissa homeen kasvulla voi olla haitallista vaikutusta rakenteisiin tai sisäilmaan.[17]

3.2 Homeen kasvuille otolliset olosuhteet

Homeen kasvu riippuu sekä lämpötilasta (T) että suhteellisesta kosteudesta (RH). Lämpötilan ja kosteuden lisäksi homeen kasvuun vaikuttaa sopivien olosuhteiden vaikutusaika sekä ravinteet (materiaali, lika materiaalin pinnalla). Homemallin mukaan homeen kasvu ei ole mahdollista, jos lämpötila, T, on alle 0 °C tai yli 50 °C. Homeen kasvu hidastuu tai pysähtyy kokonaan myös suhteellisen kosteuden (RH) ollessa materiaalin huokosissa tai materiaalin pinnalla alle kriittisen kosteuden (RH_{crit}). Kriittinen kosteus kuvaa alhaisinta suhteellisen kosteuden arvoa, jossa homeenkasvu alkaa tapahtua tietyssä lämpötilassa. Kriittinen kosteus riippuu materiaalin homeutumisherkyydestä. [17] Kuvissa 3.1 ja 3.2 on esitetty VTT:n kehittämän alkuperäisen homemallin mukainen homeen kasvun riippuvuus lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta [4]. Kuvissa suure M on homeindeksi, joka kuvaa homeen kasvun kokonaismäärää materiaalin pinnalla. Homeindeksin arvo $M=1$, kuvaa mikroskoopilla havaittavaa kasvustoa ja homeindeksin arvo $M=5$, runsasta, silmin havaittavaa kasvustoa.



Kuva 3.1.. Homeen kasvu lämpötilan funktiona [4].



Kuva 3.2. Homeen kasvu suhteellisen kosteuden funktiona [4].

3.3 Rakennusmateriaalien homehtumisriskin laskennallisen arviointi

Homehtumisriskin arviointiin käytettiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) yhdessä vuosina 2005 - 2008 kehittämää homeen kasvuriskin laskennallista mallia, josta käytetään nimitystä VTT-TTY homemalli. Mallissa homehtumisriski lasketaan eri rakennusmateriaaleille tutkittavan rakenteen muuttuvien lämpötila- ja kosteusolosuhteiden perusteella. Laskentamalli on kehitetty alun perin VTT:n tekemästä laskentamallista, jossa tutkittiin homeenkasvua puumateriaaleille [4]. Laskentamalli perustuu eri materiaaleilla tehtyihin laboratorio- ja kenttäkokeisiin. Homeen kasvua voidaan tarkastella yksittäisen materiaalin pinnalla tai kahden materiaalin välisellä rajapinnalla. Laskennassa saadut homeindeksin (M) arvot eivät kuvaa homeen haitallisuutta, vaan ainoastaan homeen kasvun kokonaismäärää materiaalien pinnoilla. Eri materiaaleille saadut homeindeksin arvot eivät siten ole vertailukel-

poisia arvioitaessa homeen terveyshaittoja ihmiselle. Hometta saattaa esiintyä avo-
huokoisissa materiaaleissa, kuten mineraalivilloissa tai vanhoissa puupohjaisissa eris-
teissä (kutterin lastu, sahanpuru) myös materiaalin sisällä. Siten homeindeksin arvo ei
välttämättä myöskään kuvaa homeen kokonaismäärää materiaalissa. [17]

Homeindeksin laskennassa käytettiin Wufi 2D -ohjelmasta saatuja lämpötila- ja koste-
usarvoja. Homeen kasvua tutkittiin laskennallisesti yksittäisestä materiaalista kahden
toisissaan kiinni olevan materiaalin välisen rajapinnan kohdalta. Rajapinnasta valittiin
laskentaan homehtumisherkeemmän materiaalin homehtumisherkkyyssluokka (HHL).
Materiaalien homehtumisherkkyyssluokat on esitetty taulukossa 3.2. Laskentamallissa
homehtumisriskiä kuvataan homeindeksillä (M), joka kuvaa homeen kasvun alkamista
ja kasvun määrää. Homeindeksi voi saada arvot välillä 0 – 6. Homeindeksin arvot 1 ja 2
kuvaavat homeen kasvua, joka on havaittavissa mikroskoopilla ja homeindeksin arvot 3
- 6 homeen kasvua, joka on havaittavissa paljaalla silmällä. Taulukossa 3.1 on esitetty
luokituskriteerit eri homeindekseille.

Taulukko 3.1. Homeindeksin arvot ja niiden luokituskriteerit. [17]

| Home- indeksi M | Havaittu homekasvu | Huomautuksia |
|--------------------|---|--|
| 0 | Ei kasvua | Pinta puhdas |
| 1 | Mikroskoopilla havaittava kasvu | Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma |
| 2 | Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu | Homerihmasto peittää 10 % tutkitta- vasta alasta (mikroskoopilla) Useita rihmastopesäkkeitä muodos- tunut |
| 3 | Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla ha- vaittava kasvu | Alle 10 % peitto alasta (silmällä) Alle 50 % peitto alasta (mikroskoopil- la) Uusia itiöitä alkaa muodostua |
| 4 | Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu | Yli 10 % peitto alasta (silmällä) Yli 50 % peitto alasta (mikroskoopilla) |
| 5 | Runsas silmin havaittava kasvu | Yli 50 % peitto alasta (silmällä) |
| 6 | Erittäin runsas kasvu | Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto |

VTT-TTY homemallissa lasketaan kriittisen kosteuden arvot (RH_{crit}) eri lämpötiloissa. Alla oleva yhtälö kuvaa kriittisen kosteuden lämpötilariippuvuutta. RH_{min} arvot eri ho-
mehtumisherkkyyssluokille on esitetty taulukossa 3.3.

$$RH_{crit} = \max \begin{cases} -0,0026T^3 + 0,16T^2 - 3,13T + 100, & \text{kun } T \leq 20^\circ\text{C} \\ RH_{min}, & \text{kun } T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.1)$$

missä,

T on lämpötila (°C)
 RH_{min} on homeenkasvun alkamisen mahdollistava suhteellisen
 kosteuden minimiarvo

Materiaalien homehtumisherkkyyys otetaan huomioon laskennassa erilaisten kertoimien avulla. Kertoimien suuruus määritetään materiaalien homehtumisherkkyyssuokkien perusteella. Materiaalien homehtumisherkkyyssuokat on määritelty laskentamallin kehitystyön yhteydessä tehtyjen laboratorio- ja kenttäkokeiden perusteella. Homehtumisherkkyyksien perusteella materiaalit jaetaan neljään eri luokkaan, joissa otetaan huomioon sekä homeen kasvunopeus, että homeen maksimimäärä. Taulukossa 2 on esitetty homehtumisherkkyyssuokat materiaaleittain.

Taulukko 3.2. Homehtumisherkkyyssuokat materiaaleittain. [17]

| Homehtumisherkkyyssuokka | Rakennusmateriaalit |
|------------------------------|---|
| Hyvin herkkä HHL 1 | Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty |
| Herkkä HHL 2 | Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevy |
| Kohtalaisen kestävä HHL 3 | Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet |
| Kestävä HHL 4 | Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homesuoja-aineita sisältävät materiaalit |

Joillain materiaaleilla homehtumisriski määräytyy kahden eri herkkyyssuokan perusteella. Tällainen materiaali on esimerkiksi kevytbetoni, jonka homeen kasvu määräytyy herkän luokan perusteella ja homeen maksimikasvu taas kestävä luokan perusteella. Muille materiaaleille homeen kasvun ja maksimihomeen herkkyyssuokat asetetaan samaksi.

Muuttuja k_1 ottaa huomioon materiaalin homehtumisnopeuden. Kertoimen arvo eri homehtumisherkkyyssuokissa lasketaan alla olevien kaavojen avulla. Kaava 3.2 vastaa tilannetta itämisprosessin aikana ja kaava 3.3 tilannetta homehtumisen edetessä. Taulukossa 3.3 on esitetty muuttujan k_1 arvot homehtumisherkkyyssuokittain sen mukaan, missä vaiheessa homeen kasvu on.

$$k_1 = \frac{t_{M=1,pine}}{t_{M=1}} \quad \text{kun } M < 1 \quad (3.2)$$

$$k_1 = 2 * \frac{t_{M=3,pine} - t_{M=1,pine}}{t_{M=3} - t_{M=1}} \quad \text{kun } M \geq 1 \quad (3.3)$$

missä,

| | | |
|----------------|----|---|
| $t_{M=1,pine}$ | on | aika, joka tarvitaan homeen kasvun alkamiseen männyllä ($\approx 1,6$ viikkoa) |
| $t_{M=3,pine}$ | on | aika, joka tarvitaan homeen näkymiseen männyllä paljain silmin (≈ 3 viikkoa) |
| $t_{M=1}$ | on | aika, joka tarvitaan homeen kasvun alkamiseen (homeindeksi saavuttaa tason $M=1$) |
| $t_{M=3}$ | on | aika, joka tarvitaan homeindeksin kohoamiseen tasolle $M=3$ |

Taulukko 3.3. k_1 arvot homehtumisherkkyyssluokittain. [17]

| Homehtumis-herkkyyssluokka | Kerroin k_1 , kun $M < 1$ | Kerroin k_1 , kun $M > 1$ |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Hyvin herkkä HHL 1 | 1 | 2 |
| Herkkä HHL 2 | 0,578 | 0,386 |
| Kohtalaisen kestävä HHL 3 | 0,072 | 0,097 |
| Kestävä HHL 4 | 0,033 | 0,014 |

Laskentamallissa M_{\max} kuvaa suurinta homeindeksin arvoa, joka voidaan saavuttaa eri lämpö- ja kosteusolosuhteissa. Lämpö- ja kosteusolojen lisäksi homeen kasvun maksimitaso riippuu materiaalista. Materiaali otetaan huomioon laskentamallissa kertoimilla A, B ja C. M_{\max} lasketaan alla olevan yhtälön avulla.

$$M_{\max} = A + B * \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - C * \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \quad (3.4)$$

missä,

| | | |
|-------------|------|--|
| RH_{crit} | on | alhaisin suhteellisen kosteuden arvo, missä homeen kasvu on mahdollista (%) |
| RH | on | suhteellinen kosteus (%) |
| A, B ja C | ovat | kertoimia, jotka ottavat huomioon homeen maksimimäärän eri homehtumisherkkyyssluokissa |

Taulukossa 3.4 on esitetty arvot kertoimille A, B ja C sekä suhteellisen kosteuden minimiarvo (RH_{\min}). RH_{\min} kuvaa suhteellisen kosteuden raja-arvoa, jota kuivemmissa olosuhteissa homehtumista ei tapahdu.

Taulukko 3.4. Kertoimet A, B ja C sekä RH_{\min} homehtumisherkkyyssuokittain. [17]

| Homehtumis-herkkyyssuokka | A | B | C | RH_{\min} , % |
|------------------------------|-----|---|-----|-----------------|
| Hyvin herkkä HHL 1 | 1 | 7 | 2 | 80 |
| Herkkä HHL 2 | 0,3 | 6 | 1 | 80 |
| Kohtalaisen kestävä HHL 3 | 0 | 5 | 1.5 | 85 |
| Kestävä HHL 4 | 0 | 3 | 1 | 85 |

Muuttuja k_2 ottaa laskennassa huomioon homeen kasvun hidastumisen homeindeksin lähestyessä maksimiarvoa. Kertoimen arvo lasketaan alla olevan yhtälön avulla.

$$k_2 = \max[1 - \exp[2,3 * (M - M_{\max})], 0] \quad (3.5)$$

Laskennassa otetaan huomioon materiaalien homehtumisherkkyyden lisäksi homeen kasvulle epäsuotuisten olosuhteiden (pakkanen ja kuivuus) vaikutus homeen määrään. Vaikutus otetaan huomioon homeenkasvun taantumana. Taantuma on jaoteltu neljään eri taantumaluokkaan materiaalien homehtumisherkkyyssuokkien mukaan. Taantuma otetaan laskennassa huomioon taantumakertoimen C_d avulla. Taulukossa 3.5 on esitetty taantumakertoimen arvot homehtumisherkkyyssuokittain.[17]

Taulukko 3.5. Taantumakerroin C_d homehtumisherkkyyssuokittain. [17]

| Homehtumis-herkkyyssuokka | Taantumaluokka | Taantumakerroin C_{mat} |
|------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Hyvin herkkä HHL 1 | Merkittävä taantuma | 0,5 |
| Herkkä HHL 2 | Kohtalainen taantuma | 0,25 |
| Kohtalaisen kestävä HHL 3 | Vähäinen taantuma | 0,1 |
| Kestävä HHL 4 | Vähäinen taantuma | 0,1 |

Uudisrakennuksissa homeindeksin maksimiarvon hyväksyttävänä raja-arvona käytettävä arvo $M < 1$ koskee kantavia rakenteita ja lämmöneristyskerrosta sekä sen sisäpuolella

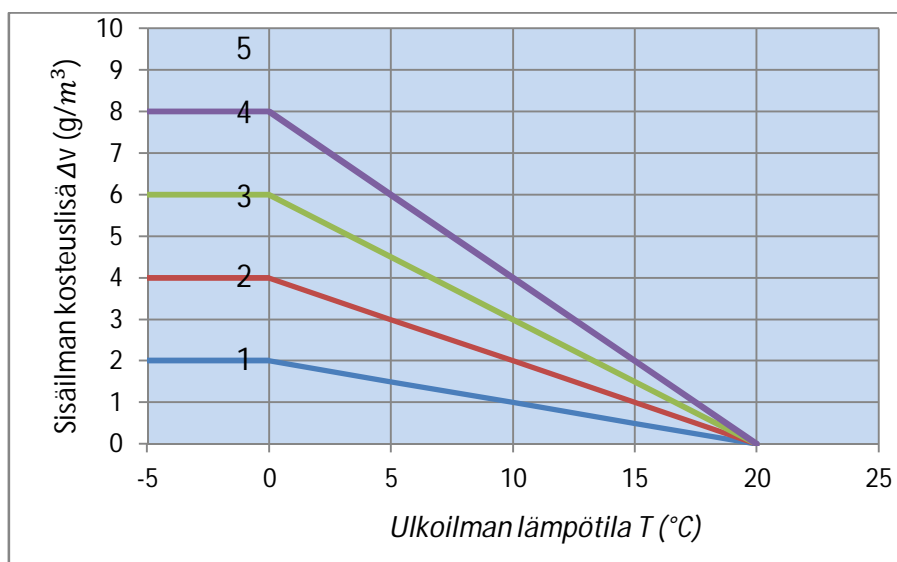
olevia materiaaleja. Myös lämmöneristeen ulkopinnassa hyväksyttävä raja-arvo on < 1 ellei lämmöneriste rajoitu suoraan tuuletusväliin tai maahan.[18]

4 LASKELMISSA KÄYTETYT SISÄ- JA ULKOILMAN OLOSUHTEET

4.1 Sisäilma

Rakennuksen sisäilma sisältää eri toiminnoista (esim. ruoanlaitto, suihkussa käynti) johtuen kosteuslisän, joka synnyttää vesihöyrypitoisuuseron sisä- ja ulkoilman välille. Kosteuslisä pyrkii tasoittumaan rakenteen läpi sisäilman suuremmasta vesihöyrypitoisuudesta ulkoilman pienempään vesihöyrypitoisuuteen vesihöyryn diffuusiolla. Lisäkos- teuden muodostus on talvella suurempi kuin kesällä. Kesäajan pienempään kosteusli- säään vaikuttaa rakennusten käyttäjien viettämä lyhyempi aika sisätiloissa sekä ikkunoi- den ja ovien auki pitäminen kesäaikana.[12]

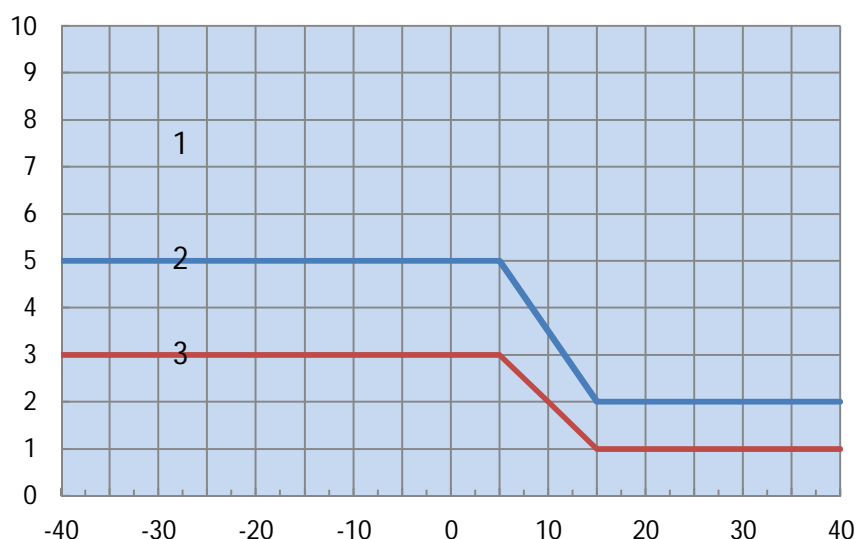
Sisäilma luokitellaan kansainvälisen standardin SFS-EN ISO 13788 mukaan viiteen eri kosteusluokkaan. Standardissa on määritetty eri kosteusluokissa käytettävät kosteuslisän arvot. Standardin mukaiset luokat ja niiden kosteuslisäarvot on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Standardin SFS-EN ISO 13788 mukaiset sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona.

Tehtyjen tutkimusten mukaan on kuitenkin suositeltavaa käyttää Suomessa kuvan 4.2 mukaisia mitoitusarvoja [12]. Siinä rakennukset jaetaan kolmeen eri kosteusluokkaan rakennustyyppin mukaan. Merkittävin ero ISO standardiin verrattuna on, että lämpötilan

ollessa + 20 °C tai sitä suurempi, kosteuslisän arvo ei alene nollaan. Tässä tutkimuksessa tutkitut rakenteet kuuluvat rakennustyyppin mukaan kosteusluokkaan 2. Kosteusluokan 2 mukaiset kosteuslisän arvot ovat talvikaudella ($T \leq +5^\circ\text{C}$) 5 g/m^3 ja kesäkaudella ($T > +15^\circ\text{C}$) 2 g/m^3 .



Kuva 4.2. Suomessa käytettävät sisäilman kosteuslisän mitoitusarvot eri kosteusluokissa ulkolämpötilan funktiona [12].

Sisäilman mitoituslämpötilana tässä tutkimuksessa käytettiin +21 °C ympäri vuoden, jolloin mitoituksessa on otettu huomioon myös jäähtymisen vaikutus kesäaikana.

4.2 Ulkoilma

Rakenteiden rakennusfysikaaliseen toimintaan vaikuttavat keskeisesti ulkoilman olosuhteet. Ulkoilman olosuhteina tässä tutkimuksessa käytettiin Jokioisten vuoden 2004 ja Vantaan vuoden 2007 ulkoilman olosuhteita. Kyseiset vuodet määriteltiin kansallisessa Frame-projektissa [14] kosteuden kondensoitumisen ja homeenkasvun kannalta kriittisiksi testivuosiksi.

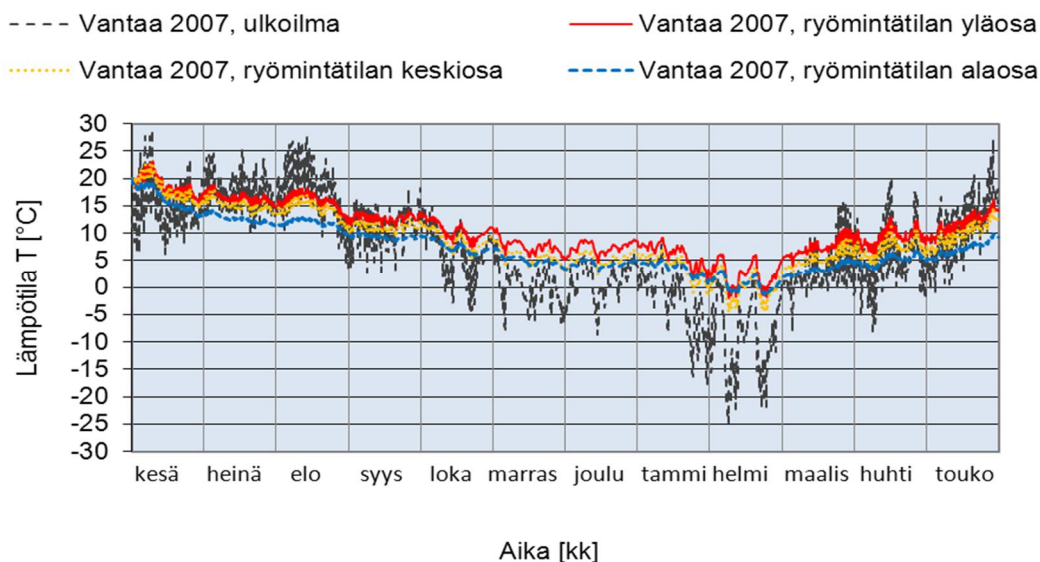
Frame-projektissa Jokioisten 2004 vuoden ilmasto todettiin kriittiseksi erityisesti rakenteilla, joiden sisäosien toimintaan viistosateella ei ollut merkittävää vaikutusta (esim. puuverhotut tuuletusraolliset julkisivut). Kyseisessä ilmastossa suhteellinen kosteus oli korkea, mikä yhdessä korkean ulkolämpötilan kanssa luo otolliset olosuhteet homeenkasvulle. Vantaan vuoden 2007 ilmasto puolestaan todettiin kriittiseksi rakenteilla, joiden sisäosien toimintaan viistosateella oli merkitystä (esim. tiiliverhotut tuuletusraolliset julkisivut ja massiivitiilirakenteet).

Valitut testivuodet edustivat todellisia esiintyneitä vuosia. Frame-projektissa valituilta neljältä paikkakunnalta otettiin huomioon 30 vuoden säädata ja tavoitteena oli, että vähintään 90 % vuosista oli vähemmän kriittisiä kosteuden kondensoitumisen ja homeenkasvun kannalta verrattuna valittuihin testivuosiiin.

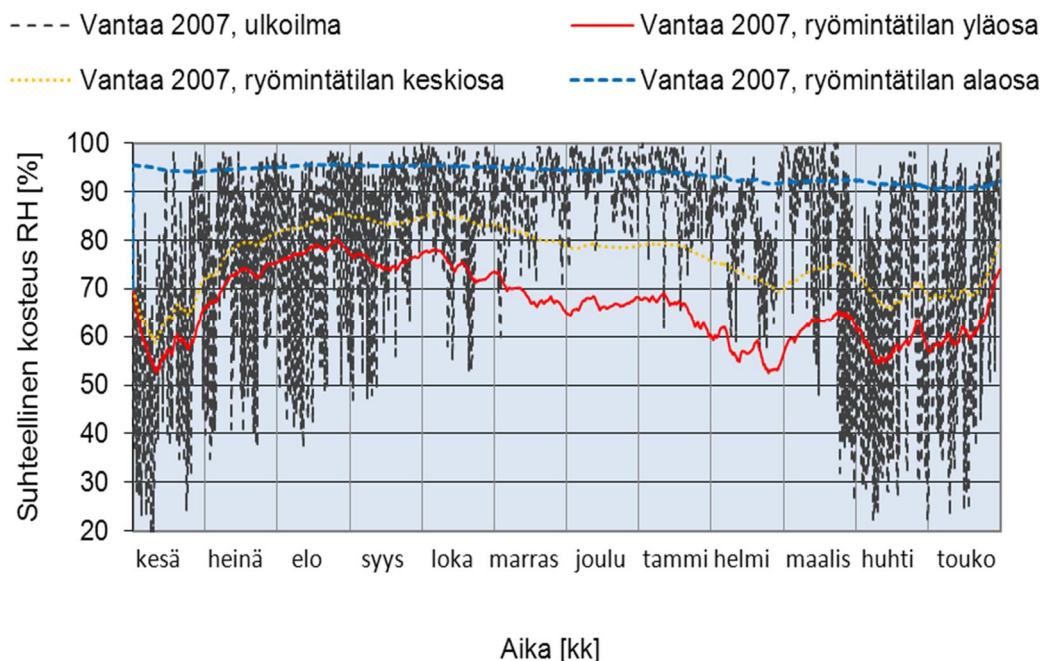
Tuuletetuissa ulkoseinärakenteissa käytettiin ilmanvaihtuvuutena puuverhotuilla ja levyrapatuilla julkisivuilla pohjoissuunnassa 100 vaihtoa tunnissa ja eteläsuunnassa 250 vaihtoa tunnissa. Tiiliverhotuissa ulkoseinärakenteissa ilmanvaihtuvuutena käytettiin pohjoissuunnassa 5 vaihtoa tunnissa ja eteläsuunnassa 10 vaihtoa tunnissa. Käytetyt arvot perustuvat TTY:llä aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin [7].

4.2.1 Ryömintätila

Julkaisussa RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet on annettu ohjeet ryömintätilojen tavoiteltavasta ilmanvaihdosta [12]. Tämän tutkimuksen laskentatarkasteluissa ryömintätilat mallinnettiin 800 mm korkeana ilmakerroksena, johon lisättiin ohjeistuksen mukainen ilmanvaihto, yksi kertaa tunnissa. Kuvassa 4.3 on esitetty esimerkki ryömintätilaan muodostuvista lämpöolosuhteista ja kuvassa 4.4 ryömintätilaan muodostuvista kosteusolosuhteista. Esimerkin ulkoilmaolosuhteina on käytetty Vantaan 2007 ulkoilmaolosuhteita ja ryömintätilan lämpötila- ja kosteusarvot ovat luvussa 6.11 käsiteltävän hirsitalon ryömintätilasta.



Kuva 4.3 Vantaan vuoden 2007 ulkoilman lämpötilat ja luvussa 6.11 tarkasteltavan rakenneratkaisun ryömintätilan lämpötilat eri korkeuksilla.



Kuva 4.4 Vantaan vuoden 2007 ulkoilman suhteellinen kosteus ja luvussa 6.11 tarkasteltavan rakennerratkaisun ryömintätilan suhteelliset kosteudet eri korkeuksilla.

4.2.2 Maapohjan olosuhteet

Tutkimuksessa tarkasteltujen alapohja- ja perusmuurirakenteiden ulkopuolisena maaineena käytettiin hiekkaista soraa. Ryömintätilojen maapohjan yläpinnassa käytettiin lisäksi 200 mm:n kerrosta kevytsoraeristettä. Laskennassa otettiin huomioon 2500 mm leveästi sokkelin ulkopuolista maarakennetta ja 1500 mm leveästi sokkelin sisäpuolista maarakennetta. Lattian sisäpinnan alapuoliset rakenteet mallinnettiin 3000 mm:n syvyydelle, jossa käytettiin laskennassa pohjavesiolosuhteita.

4.2.3 Ilmansuunnat

Tutkittaviksi ilmansuunniksi valittiin Jokioisten 2004 ulkoilman olosuhteissa pohjoinen ja Vantaan 2007 ulkoilman olosuhteissa etelä. Eteläsuunnassa on Suomessa tyypillisesti kovin viistosaderasitus ja auringonsäteilyä kohdistuu etelän puoleisille seinille eniten. Auringon säteily kuivattaa ulkoverhousta, mutta samalla sen vaikutuksesta ulkoverhoukseen imeytynyt kosteus pyrkii siirtymään seinärakenteen sisälle. Pohjoissuunnassa viistosaderasitus on pienempi, mutta samalla auringon säteily lämmittää ja kuivattaa pohjoissuunnan ulkoverhousta vähemmän [14].

4.2.4 Viistosade

Viistosateella tarkoitetaan sateen vaakasuoraa komponenttia. Viistosateen, W_{wdr} (mm/hm^2), määrä jatkuvuustilassa voidaan laskea kaavalla

$$W_{wdr} = 0,222 * r_a * W_h^{0,88} \quad (4.1)$$

missä,

r_a on tuulen nopeus (m/s)
 W_h on sademäärä vaakapinnalle (mm/hm^2)

Todellisuudessa ulkoseiniin osuvan sateen määrä riippuu lisäksi sadepisaroiden koosta, rakennuksen korkeudesta ja geometriasta, rakennuksen sijainnista tuulen suuntaan nähden ja muista sateelta suojaavista ympäristötekijöistä. Erityisesti rakennuksien yläosat ja nurkat ovat alttiita viistosateen aiheuttamalle kosteusrasitukselle [3]. Wufi-2D ohjelmassa seinäpinnalle tulevan viistosateen, R_s ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), määrä lasketaan vaakapinnalle tulevan sateen määrästä, R_n ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$), ottamalla huomioon tuulen nopeus, r_a (m/s), vaikutus ja tarkasteltavan seinäpinnan korkeusasema. Seinäpinnalle tulevan sateen määrä lasketaan kaavalla (Künzel 1995) [3]

$$W_s = r_a * r_s * W_n \quad (4.2)$$

missä,

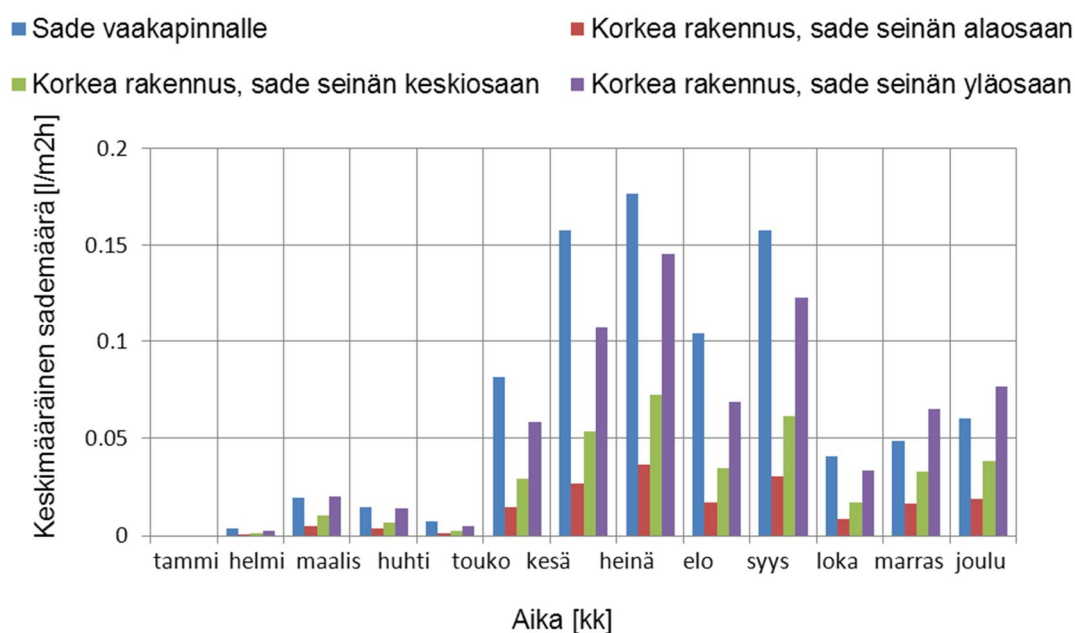
W_s on seinäpinnalle tuleva viistosade ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 L_a on tuulen nopeus (m/s)
 r_s on viistosadekerroin (s/m)
 W_n on vaakapinnalle tuleva sade ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

Tässä tutkimuksessa on käytetty rakennustyyppistä ja korkeudesta riippuen taulukon 4.1 mukaisia viistosadekertoimia, jotka on annettu Wufi 1D-ohjelmassa.

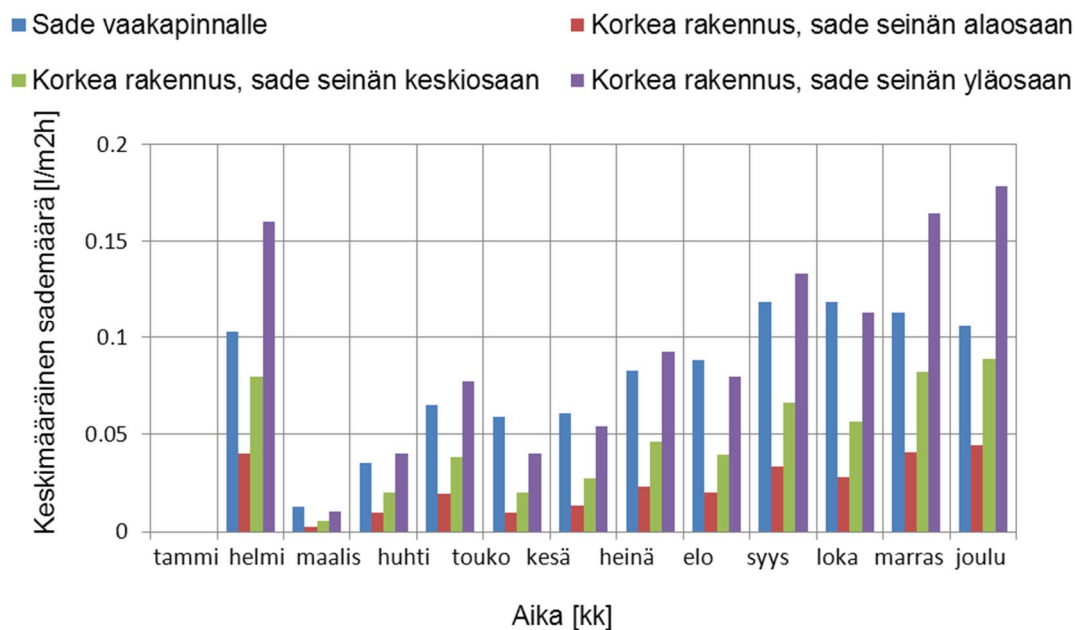
Taulukko 4.1. Viistosadekertoimet rakennustyyppin ja tarkasteltavan seinäpinnan korkeusaseman mukaan.[19]

| Rakennustyyppi/seinän korkeusasema | Korkeus h (m) | Viistosadekerroin r_s (s/m) |
|------------------------------------|---------------|-------------------------------|
| Matala rakennus | $h < 10$ | 0,07 |
| Korkea rakennus, alaosa | $h < 10$ | 0,05 |
| Korkea rakennus, keski-osa | $10 < h < 20$ | 0,1 |
| Korkea rakennus, yläosa | $h > 20$ | 0,2 |

Kuvassa 4.5 on esitetty tässä tutkimuksessa käytetyn Jokioisten vuoden 2004 ilmaston kuukausittaisen sademäärän keskiarvot vaakapinnalle ja pohjoisen puoleiselle julkisivupinnalle eri korkeuksilla. Kuvassa 4.6 on esitetty vastaavasti Vantaan vuoden 2007 ilmaston kuukausittaisen sademäärän keskiarvot vaakapinnalle ja etelän puoleiselle julkisivupinnalle eri korkeuksilla. Kuvista on nähtävissä tuulen nopeuden ja tarkasteltavan seinäpinnan korkeuden vaikutus seinäpinnalle osuvaan saderasitukseen.



Kuva 4.5. Kuukausittaiset sademäärän keskiarvot ($l/(m^2h)$) Jokioisten 2004 ilmastossa vaakapinnalle ja julkisivun eri korkeuksille korkeassa rakennuksessa.



Kuva 4.6. Kuukausittaiset sademäärän keskiarvot ($l/(m^2h)$) Vantaan 2007 ilmastossa vaakapinnalle ja julkisivun eri korkeuksille korkeassa rakennuksessa.

Julkisivupintaan sateesta imeytyvä kosteus, g_w (kg/m^2s), lasketaan Wufi 2D-ohjelmassa kaavalla (Künzel 1995)

$$g_w = a_r W_s \quad (4.3)$$

missä,

a_r on pinnan adsorptiokerroin (-)

Adsorptiokerroin kuvaa viistosateesta seinäpintaan imeytyvän kosteuden määrää. Adsorptiokertoimen arvoon vaikuttaa seinäpinnan materiaali ja pinnan karkeus. Tässä tutkimuksessa on käytetty alla olevan taulukon 4.2 mukaisia adsorptiokertoimen arvoja.[7]

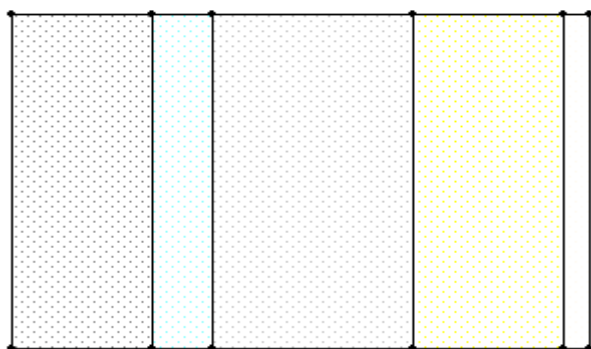
Taulukko 4.2. Laskelmissa käytetyt adsorptiokertoimen arvot.

| Rakennuksen tyyppi ja korkeus | Adsorptiokerroin a_r |
|-------------------------------|------------------------|
| tiili ja rappaus | 0,7 |
| puu | 0,5 |
| betoni | 0,2 |
| silikonihartsipinnoite | 0,1 |

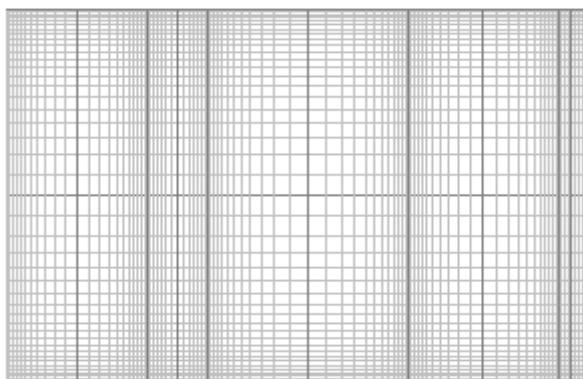
5 LASKENTATARKASTELUJEN TOTEUTUS

5.1 Tutkimusmenetelmät

Rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen tarkastelu suoritettiin Wufi-2D 3.3-ohjelmalla huomioiden muuttuvat lämpö- ja kosteusolosuhteet. Laskennat suoritettiin kolmen vuoden pituisina tarkastelujaksoina, joista viimeisen vuoden tuloksista analysoitiin tarkastelupisteiden lämpö- ja kosteusolosuhteet. Laskentaan käytettävässä Wufi-ohjelmassa rakennekerrokset on jaettu x- ja y-suunnassa elementteihin. Laskennassa rakennekerrosten lämpö- ja kosteusolosuhteet muuttuvat ainoastaan elementtien rajalla, eli yhden elementin sisällä olevat olosuhteet ovat aina samat. Jotta laskentatulokset olisivat mahdollisimman tarkat, käytetään laskennassa tihennettyä elementtiverkkoa. Kuvassa 5.1 on näytetty Wufi-ohjelmaan mallinnettu ulkoseinärakenne (US2) ja kuvassa 5.2 saman rakenteen elementtijako.



Kuva 5.1. Wufi-2D malli ulkoseinärakenteesta US2.



Kuva 5.2. Wufi-2D elementtijako ulkoseinärakenteesta US2.

Saatujen lämpö- ja kosteusolosuhteiden perusteella suoritettiin laskennallinen homeriskin arviointi. Homeen kasvua tutkittiin laskennallisesti TTY:n ja VTT:n yhdessä kehittämän laskentamallin avulla, jossa homeen kasvua kuvataan homeindeksi-luvulla (M) [17]. Laskentamalli on kehitetty alun perin VTT:llä tehdyn homeriskin laskentamallin pohjalta [4]. Hyväksyttävänä rajana homeindeksillä pidettiin homeen kasvulle arvoa $M \leq 1$, joka tarkoittaa, että homeenkasvu ei ole sallittua tarkasteltavassa kohdassa. Laskennassa tarvittavien rakennusmateriaalien ominaisarvoiksi valittiin Suomessa käytettävien rakennusmateriaalien arvoja, jotka on määritetty Tampereen teknillisessä yliopistossa aiemmin tehtyjen projektien yhteydessä [7,16].

5.2 Tarkastelupisteiden ja raja-arvojen valintaperiaatteet

Lämmöneristekerroksessa tai sen sisäpuolella kasvavien homeiden ja niiden aineenvaihduntatuotteiden siirtyminen sisäilmaan ilmavuotojen kautta, tapahtuu huomattavasti helpommin, kuin esimerkiksi ulkoverhouksesta tai ulkoverhouksen tuuletusvälistä tai alapohjan ryömintätilasta. Siksi laskentatarkasteluissa kosteuden kondensoitumista ja homeenkasvua päädyttiin tutkimaan lämmöneristekerroksen sisä- ja ulkopinnasta.

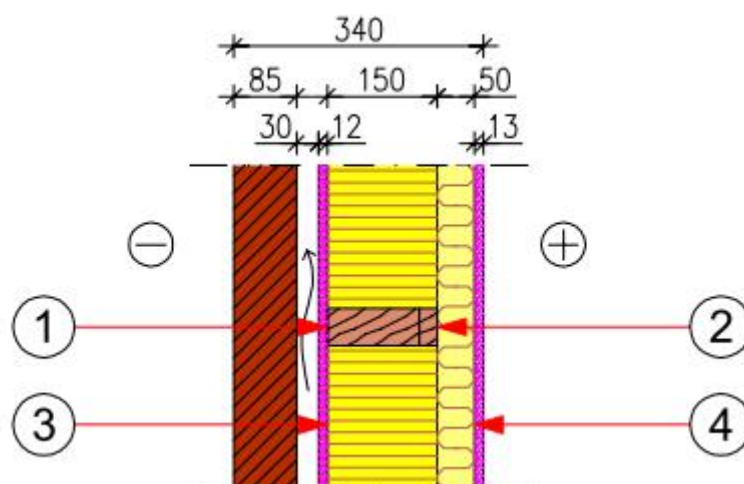
Homeenkasvulle tyypillinen ominaisuus on, että kerran homehtumaan päässyt materiaali homehtuu herkemmin uudestaan, jos olosuhteet ovat homeenkasvulle otolliset. Sen seurauksena homeen määrä ja haittavaikutukset voivat lisääntyä ajan mukana. Tätä ilmiötä ei homemallissa oteta huomioon. Lisäksi laskennassa käytetyt testivuodet eivät ole kriittisyydestään huolimatta kaikkein kriittisimpiä vuosia homeen kasvun kannalta. Asettamalla raja-arvo riittävän alhaiseksi ($M \leq 1$), voidaan tämän ilmiön vaikutus jättää huomioimatta laskentatarkastelussa.[14]

Laskentatarkasteluissa ei huomioitu ylimääräistä kosteutta, joka voi päästä rakenteeseen ilmapvirtausten tai sadeveden mukana mahdollisten rakennusvirheiden seurauksena. Rakennuksen lähellä oleva mikroilmasto saattaa aiheuttaa ulkovaipan kohdissa huomattavasti suuremman kosteusrasituksen, kuin mitä laskelmissa on huomioitu. Lisäksi laskentatarkastelujen sisältämät epävarmuustekijät kuten laskentaohjelmien sisältämät yksinkertaistukset ja puutteet aiheuttavat laskentatuloksiin epävarmuustekijän. Sen vuoksi rakenteiden toimintaan kosteuden osalta haluttiin saada lisävarmuutta, eikä kosteuden kondensoitumista tarkastelupisteissä hyväksytty lainkaan. Tämän johdosta ei myöskään katsottu tarpeelliseksi määrittää kondensoituneen kosteuden määrää.[14]

6 LASKENTATULOSTEN TARKASTELU

6.1 70-luvun puurunkoisen pientalon tiiliverhottu ulkoseinä

70-luvulla rakennetun pientalon ulkoseinärakenteessa, US1 (ks. liite 2 ja kuva 6.1.1), ulkopuolen tiiliverhous, ilmarako ja vanha huokoinen puukuitu tuulensuojalevy säilytettiin ja uusi eristyskorjaus toteutettiin laskentamallissa rakenteen sisäpuolelta. Vanha rakenne US1V on 70-luvun pientalon korjausoppaasta (ks. liite 2) [6]. Laskentamallissa korvattiin alkuperäisen rakenteen vanha mineraalivillaeeriste kantavien puurankojen välissä ruiskutettavalla Ekospray eristeellä. Ekospray eristeen paksuutta kasvatettiin 25 mm lisäämällä puinen pystykoolaus $25 \times 50 \text{ mm}^2$ rankojen sisäpintaan. Kantavan rungon sisäpuolelle mallinnettiin lisäksi puinen vaakakoolaus $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 600 mm:n jaolla ja koolauspuiden väliin mineraalivillaeeriste. Sisäpuolen verhouslevynä käytettiin 13 mm:n kipsilevyä. Tuuletusraon ilmanvaihtona käytettiin pohjoissuunnassa 5 l/h ja eteläsuunnassa 10 l/h [7]. Tarkastelut tehtiin huokoisen puukuitulevyn sisäpinnasta puurangan kohdalta (tarkastelupiste 1), huokoisen puukuitulevyn sisäpinnasta Ekospray-eristeen kohdalta (tarkastelupiste 3), pystykoolauksen sisäpinnasta mineraalivillaeeristeen kohdalta (tarkastelupiste 2) sekä kipsilevyn ulkopinnasta mineraalivillan kohdalta (tarkastelupiste 4). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.1.1.



Kuva 6.1.1. Ulkoseinärakenne 1, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

Rakenteessa suhteellinen kosteus on korkealla rakenteen ulko-osissa, missä myös homeindeksi nousee selvästi yli hyväksyttävänä pidettävän rajan ($M < 1$) molempien testivuosien ilmastoissa (tarkastelupisteet 1 ja 3). Homeindeksi ja suhteellinen kosteus on korkea erityisesti etelän puoleisessa tarkastelussa Vantaan 2007 ilmastossa, missä on

suurempi viistosaderasitus julkisivupinnalle. Viistosaderasituksen johdosta tiiliverhoukseen sitoutunut kosteus siirtyy haihtumalla auringon lämmittäessä tuuletusrakoon ja siitä diffuusiona rakenteen sisäosiin. Vähäinen lämmöneristekerros runkorakenteen ulkopuolella laskee runkorakenteen ulkopinnan lämpötilaa ja yhdessä korkean suhteellisen kosteuden kanssa luo otolliset suhteet homeenkasvulle. Tulos osoittaa samaa, kuin Frame-projektissa tehdyt tutkimukset tiiliverhotuilla julkisivurakenteilla [14]. Sisäpuolen pystykoolauksen pinnassa (tarkastelupiste 2) suhteellinen kosteus nousee hetkellisesti yli kriittisen RH arvon molempien testivuosien ilmastoissa (kriittinen RH = suhteellisen kosteuden arvo, jossa homeenkasvu on mahdollista), mutta homeindeksi pysyy kuitenkin selvästi hyväksyttävänä pidettävän rajan alapuolella. Tarkastelupisteessä 4 ei synny homeenkasvulle otollisia olosuhteita. Kosteuden tiivistymistä ei tarkastelupisteissä esiinny. Taulukossa 6.1.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.1.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US1.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Huokoinen puukuitulevy | 1 | 2,26 | 89,97 | 4,89 | 95,82 |
| 2 | Puu | 1 | 0,26 | 85,11 | 0,16 | 84,16 |
| 3 | Huokoinen puukuitulevy | 1 | 1,82 | 95,50 | 5,50 | 97,04 |
| 4 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 74,20 | 0,00 | 77,52 |

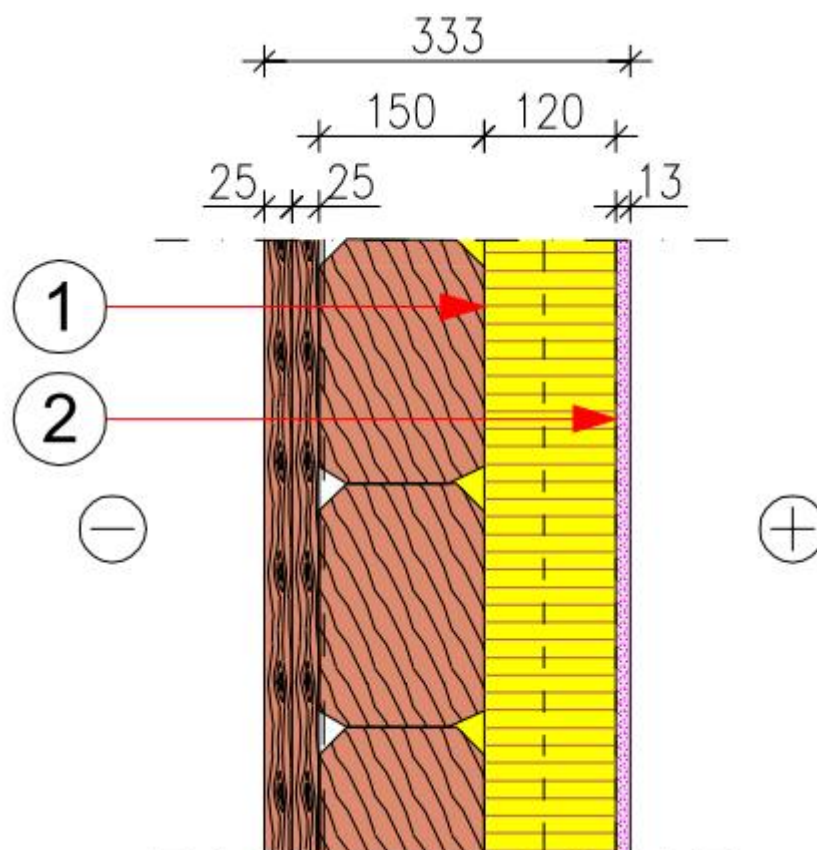
6.2 70-luvun puurunkoisen pientalon valesokkeli

Ulkoseinärakenteessa, US2V (ks. liite 3), tutkittiin 70-luvulla rakennetun pientalon korjattua ulkoseinän alaosan rakennetta valesokkelin kohdalla. Vanha rakenne on 70-luvun pientalon korjausoppaasta [6]. Laskentamallissa alkuperäisen seinärakenteen alaohjauspuu ja puurangan alaosat korvattiin kevytsoraharkkoilla. Huokoinen puukuitu tuulensuojalevy ja vanhat eristeet poistettiin. Vanhan betonisokkelin ja kevytsoraharkon väli täytettiin ruiskutettavalla Ekospray-eristeellä ja harkkorakenteen sisäpuolelle lisättiin mineraalivillaeriste. Laskenta tehtiin ulkoseinän, sokkelin ja alapohjan liittymien tarkastelun yhteydessä (ks. liitteet 3 ja 4 ja luku 6.10) ja laskentatulokset on esitetty luvussa 6.10.

6.3 Sisäpuolelta lisäeristetty pientalon hirsiseinä

Ulkoseinärakenteessa, US3 (ks. liite 2 ja kuva 6.3.1), tutkittiin lautaverhoiltua 150 mm paksua sisäpuolelta lisäeristettyä vaakahirsirunkoista seinärakennetta. Vanha rakenne on

kirjasta, *Perinnemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito* [11]. Laskentamallissa alkuperäiseen seinärakenteeseen, US3V (ks. liite 2) lisättiin sisäpuolelle 120 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä, 66 mm leveä teräsrankarunko ja kipsilevy. Rakenne mallinnettiin sijoittamalla teräsrankarunko irti hirsirakenteesta. Ratkaisulla saatiin yhtenäinen ilmatiivis eristekerros hirsirakenteen sisäpintaan ja samalla vältettiin kylmäsiltojen muodostuminen rakenteeseen. Tarkastelut tehtiin hirren sisäpinnasta (tarkastelupiste 1) ja kipsilevyn ulkopinnasta (tarkastelupiste 2).



Kuva 6.3.1. Ulkoseinärakenne 3, pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

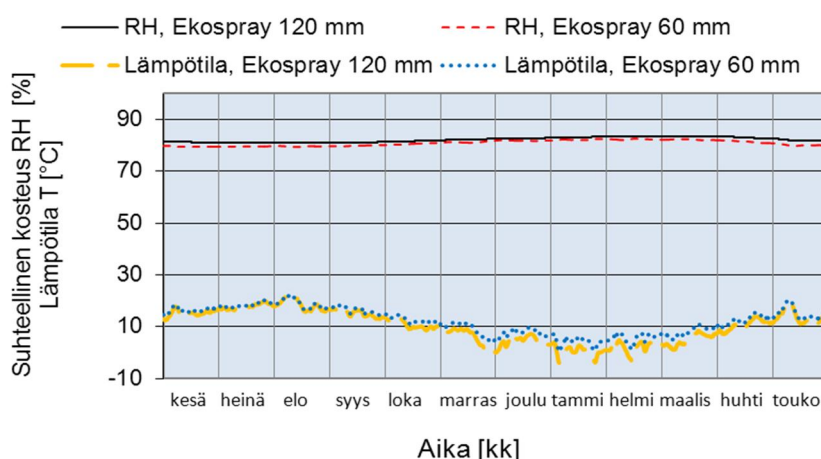
Tarkastelupisteessä 1 suhteellinen kosteus on koko vuoden ajan yli 80 % RH arvon molempien laskennassa käytettyjen testivuosien ilmastoissa. Korkeasta suhteellisen kosteuden arvosta huolimatta homeindeksin arvo ei ylitä hyväksyttävänä pidettävää rajaa ($M < 1$) missään vaiheessa tarkasteluvuotta. Lämmöneristeen sisäpinnassa tarkastelupisteessä 2 suhteellinen kosteus pysyy alle 80 % koko vuoden, eikä homeen kasvulle otollisia olosuhteita pääse muodostumaan. Vaikka homeindeksin arvo 1 ei ylitykään, saattaa rakenne olla riskialtis. Hirsirungon kosteus- ja lämpötilamuodonmuutokset voivat synnyttää halkeamia, joista kostea sisäilma pääsee virtaamaan lämmöneristeen taakse. Taulukossa 6.3.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.3.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin (eristepaksuus 120 mm rakenteessa US3).

| Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,79 | 83,46 | 0,72 | 82,21 |
| 2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 73,77 | 0,00 | 76,87 |

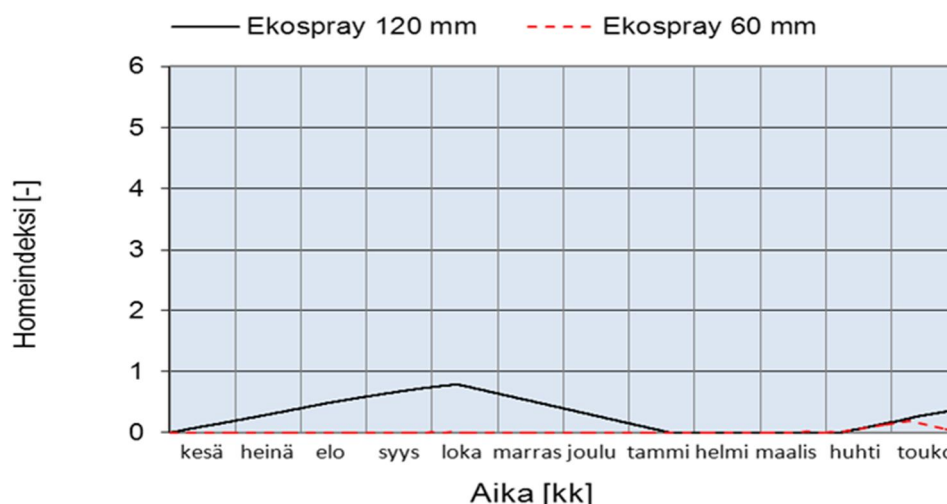
Rakenteen sisäpuolelle asennettu lämmöneriste laskee hirsiseinän lämpötilaa, mikä puolestaan nostaa suhteellisen kosteuden arvoa hirsirakenteen ja lämmöneristeen rajapinnassa, jolloin homeenkasvun riski kasvaa. Rakenteen sisäpinnan ollessa tiivis ja vesihöyrynvastuksen ollessa riittävän suuri, ei sisäilmasta pääse diffuusion seurauksena kosteutta rakenteen sisään, mikä puolestaan vähentää homeen kasvun riskiä. Sisäpuolelta lämmöneristetyin 150 mm paksun hirsiseinän vesihöyrynvastuksen minimiarvon tulisi olla $n. 25 \cdot 10^9 \text{ (m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg}$ [12], joka saavutetaan 60 mm:n paksuisella kerroksella ruiskutettavaa Ekospray eristettä.

Rakenteesta tehtiin vertailulaskelmat Jokioisten 2004 ulkoilmaolosuhteissa pienentämällä eristepaksuutta 90 mm:iin ja 60 mm:iin. Tarkastelupisteessä 1 eristepaksuuden 30 mm:n suuruusella pienentämisellä ei ollut merkittävää vaikutusta kosteus- ja lämpötilaolosuhteisiin. Sen sijaan eristepaksuuden pienentäminen 60 mm:iin nosti lämpötilaa hirren ja eristeen välissä ja sen seurauksena suhteellisen kosteuden arvo tipahti suurimmaksi osaksi vuotta alle 80 % ja homeen kasvun riski pieneni oleellisesti (ks. kuva 6.3.3). Kuvassa 6.3.2 on esitetty lämpötilat ja suhteellisen kosteuden arvot kuukausittain eristepaksuuksille 60 ja 120 mm Jokioisten 2004 ilmastossa.



Kuva 6.3.2. Tarkastelupisteessä 1 suhteelliset kosteudet ja lämpötilat eristepaksuuksilla 60 ja 120 mm Jokioisten 2004 ilmastossa.

Homeindeksin maksimi arvo laskee eristepaksuuden puolittamisen jälkeen alle 0,2. Kuvassa 6.3.3 on esitetty homeindeksien arvot kuukausittain eristepaksuuksilla 60 ja 120 mm Jokioisten 2004 ilmastossa.

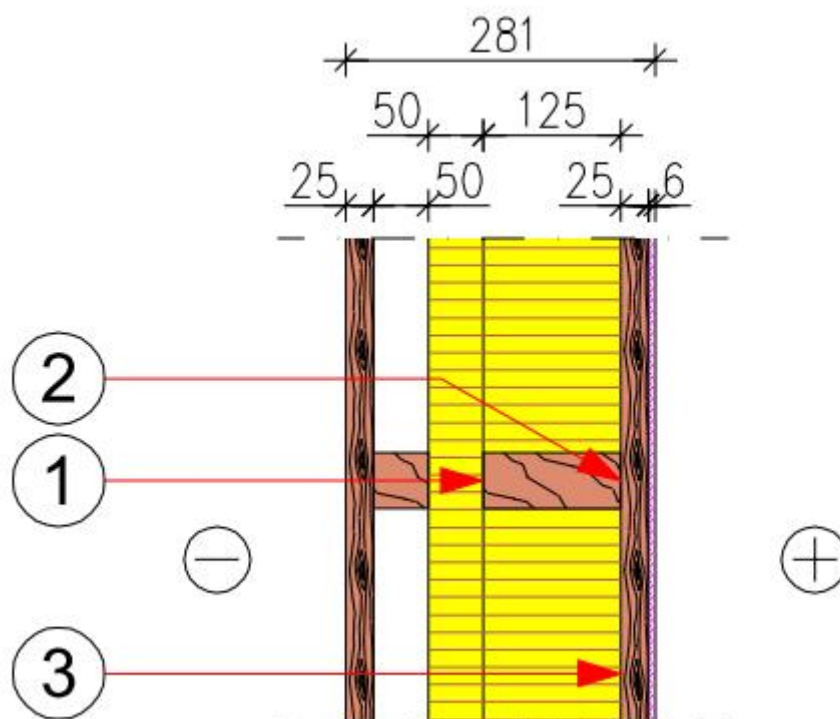


Kuva 6.3.3. Tarkastelupisteen 1 homeindeksien arvot eristepaksuuksilla 60 ja 120 mm Jokioisten 2004 ilmastossa.

Kuvista 6.3.2 ja 6.3.3 nähdään hyvin, mikä merkitys on hirsirakenteiden sisäpuolisen lisäeristystyksen optimoinnilla, jotta ei luoda homeen kasvuille otollisia olosuhteita hirsirakenteen sisäpintaan.

6.4 Rintamamiestalon korjattu puurunkoinen ulkoseinä

Vanhan rintamamiestalon puurunkoisesta ulkoseinästä tutkittiin kolmea korjausratkaisua. Vanha rakenne on kirjasta, *Perinnemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito* [11]. Laskentamallissa ulkoseinä rakenteesta US4 (ks. liite 2 ja kuva 6.4.1) vanhasta ulkoseinä rakenteesta, US4V (ks. liite 2), poistettiin ulkopuolelta puuverhous ja vino-laudoitus ja purueristeet korvattiin ruiskutettavalla Ekospray eristeellä. Kantavan rungon ulkopuolelle lisättiin vielä 50 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä, 50 mm:n levyinen tuuletusrako ja puu-ulkoerhous. Tuuletusraon ilmanvaihtuvuutena käytettiin pohjoissuunnassa arvoa 100 1/h ja eteläsuunnassa 250 1/h [7]. Tarkastelut tehtiin kantavan puurangan sisä- ja ulkopinnasta (tarkastelupisteet 1 ja 2), sekä sisäpuolisen laudoituksen ulkopinnasta (tarkastelupiste 3). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.4.1.



Kuva 6.4.1. Ulkoseinärakenne 4, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

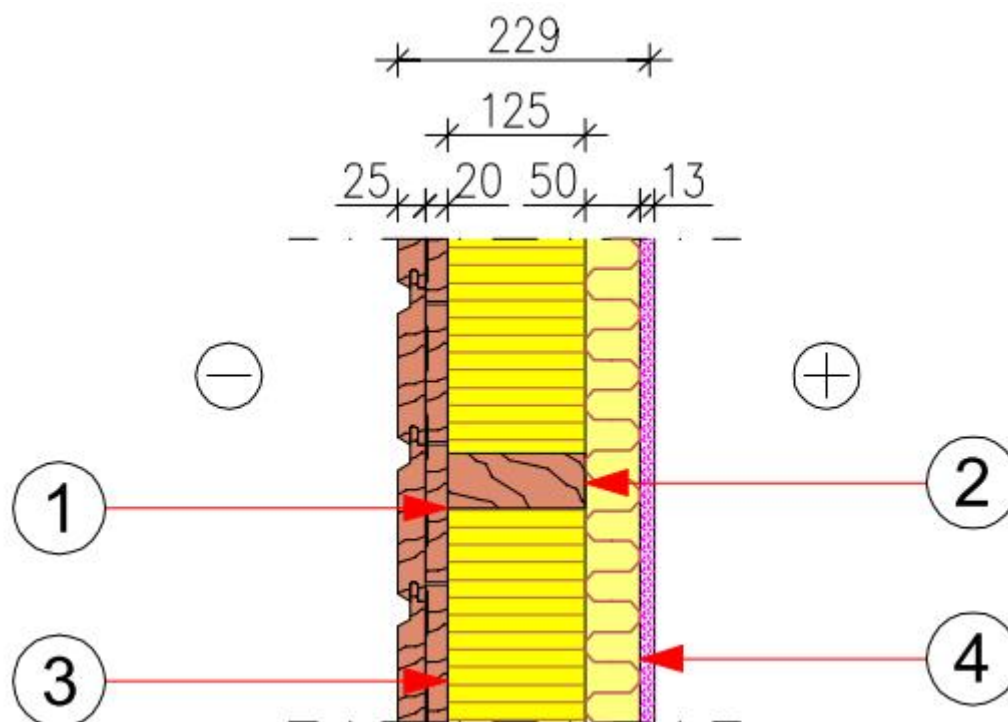
Rakenteen ulkopuolelle lisätty 50 mm:n eristekerros toimii lämpöä eristävänä tuulen-suojakerroksena. Runkotolpan ulkopinnan lämpötila nousee ja samalla suhteellinen kosteus laskee, mikä parantaa kantavan rakenteen ulkopinnan lämpö- ja kosteusteknistä toimivuutta. Tehdyissä laskelmissa missään tarkastelupisteessä ei tapahdu kosteuden tiivistymistä eikä homeindeksi ylitä hyväksyttävänä pidettävää rajaa ($M < 1$). Taulukossa 6.4.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homeutumisherkkyyssluokat.

Taulukko 6.4.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homeutumisherkkyyssluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US4.

| Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,00 | 64,22 | 0,00 | 63,29 |
| 2 | Puu | 1 | 0,00 | 61,29 | 0,00 | 62,24 |
| 3 | Puu | 1 | 0,00 | 62,02 | 0,00 | 62,95 |

Ulkoseinärakenteessa, US5 (ks. liite 2 ja kuva 6.4.2), laskentamallissa vanhan rintamiestalon ulkoseinän, US5V (ks. liite 2), korjaus tehtiin sisäpuolelta. Vanhat eristeet korvattiin ruiskutettavalla Ekospray-eristeellä. Rungon sisäpuolelle asennettiin puinen 50x50 mm² lisävaakakoolaus 600 mm:n jaolla ja mineraalivilla sekä sisäpintaan 13 mm paksu kipsilevy. Tarkastelut tehtiin ulkopuolisen vinolaudoituksen sisäpinnasta kantavan puurangan kohdalta (tarkastelupiste 1), ulkopuolisen vinolaudoituksen sisäpinnasta

eristeen kohdalta (tarkastelupiste 3), kantavan puurangan sisäpinnasta (tarkastelupiste 2) ja kipsilevyn ulkopinnasta (tarkastelupiste 4). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.4.2.



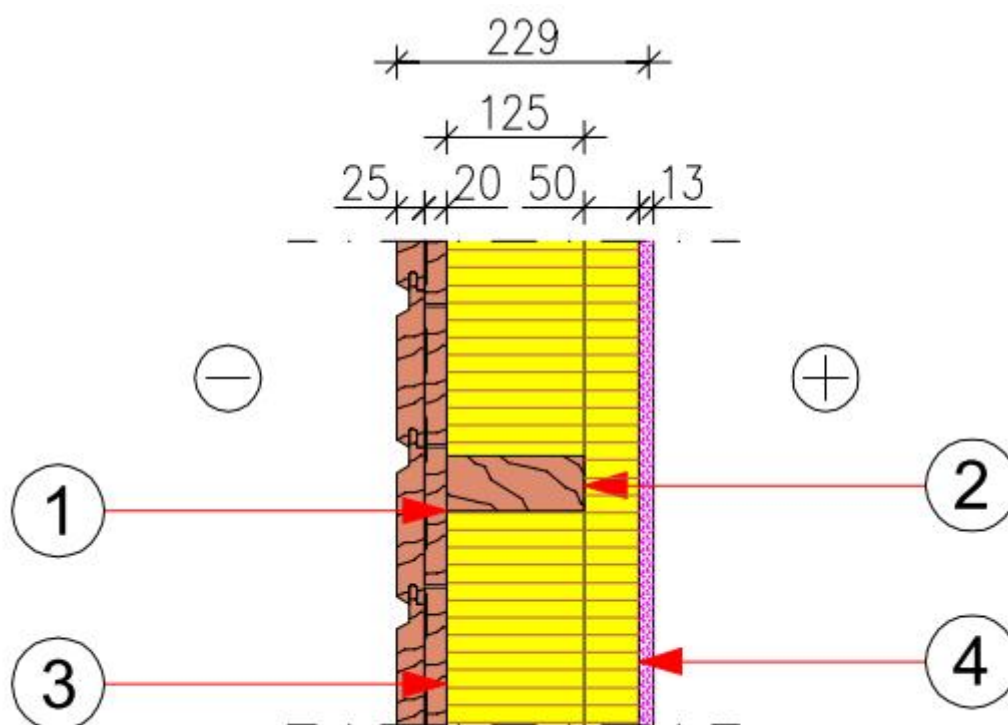
Kuva 6.4.2. Ulkoseinärakenne 5, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

Laskelmien mukaan tarkastelupisteissä 1, 3 ja 4 ei tapahdu kosteuden tiivistymistä eikä homeindeksi ylitä hyväksyttävänä pidettävää rajaa ($M < 1$). Tarkastelupisteeseen 2 pääsee sisäilmasta siirtymään kosteutta diffuusiolla. Vaikka rakenne pääsee kuivumaan kahteen suuntaan puurangan kohdalla, on pisteeseen 2 tuleva kosteus määrä suurempi, kuin mitä siitä ehtii lämpimien kesäkuukausien aikana kuivumaan. Kosteusrasituksen seurauksena tarkastelupisteessä 2 Jokioisten 2004 ilmastossa homeindeksi ylittääkin arvon yksi ja Vantaan 2007 ilmastossa homeindeksi kohoaa lähelle arvoa yksi. Kosteuden tiivistymistä ei tarkastelupisteessä 2 esiinny. Taulukossa 6.4.2 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat. Ulkoseinärakennetta US5 tarkasteltiin myös lisäämällä laskentamalliin 32 mm leveä tuuletusrako puu-ulkoeristyksen ja vino-laudoituksen väliin. Tuuletusraon lisäämisellä ei ollut oleellista vaikutusta laskennan tuloksiin. Tuuletusraon lisääminen rakenteeseen vahvisti myös sen, ettei viistosateella ole merkitystä tarkastelupisteeseen 2 syntyviin kosteusolosuhteisiin.

Taulukko 6.4.2. Homeindeksien ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US5.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,00 | 75,87 | 0,00 | 74,49 |
| 2 | Puu | 1 | 1,20 | 90,84 | 0,86 | 88,95 |
| 3 | Puu | 1 | 0,00 | 81,87 | 0,00 | 79,52 |
| 4 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 74,34 | 0,00 | 77,48 |

Ulkoseinärakenteessa, US5.1 (ks. liite 2 ja kuva 6.4.3), laskentamallissa korvattiin ulkoseinärakenteessa US5 käytetty mineraalivilla ruiskutettavalla Ekospray eristeellä.



Kuva 6.4.3. Ulkoseinärakenne 5.1, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

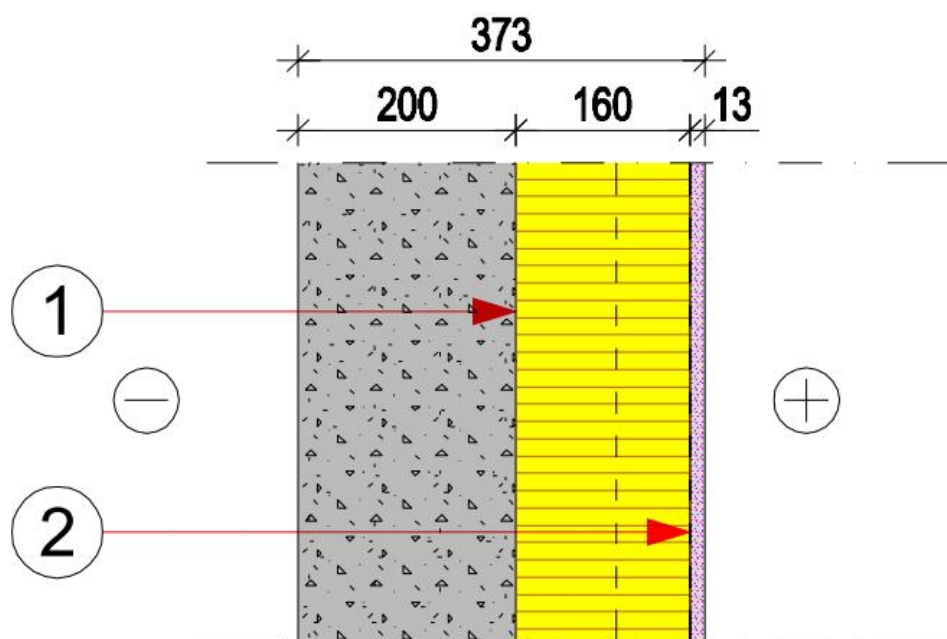
Sisäpuolen eristeen muutos ei vaikuta tarkastelupisteiden 1, 3 ja 4 suhteellisiin kosteuksiin merkittävästi ja homeindeksi pysyy edelleen nollana. Sen sijaan rakenteen sisäpinnan vesihöyrynvastuksen parantumisen seurauksena tarkastelupisteen 2 suhteellinen kosteus laskee ja tästä johtuen myös homeindeksin arvo laskee nollaan. Taulukossa 6.4.3 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.4.3. Homeindeksien ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US5.1.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,00 | 75,26 | 0,00 | 73,90 |
| 2 | Puu | 1 | 0,00 | 75,20 | 0,00 | 74,41 |
| 3 | Puu | 1 | 0,00 | 80,36 | 0,00 | 78,00 |
| 4 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 73,92 | 0,00 | 76,92 |

6.5 Rintamamiestalon kellarin seinä

Rintamamiestalon kellarin vanhasta seinärakenteesta, US6V (ks. liite 2) poistettiin laskentamallissa vanha sisäpuolinen tiilimuuraus. Vanha rakenne on kirjasta, *Perinnemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito* [11]. Uuteen rakenteeseen, US6 (ks. liite 2 ja kuva 6.5.1) lisättiin ruiskutettavaa Ekospray eristettä betoniseinän sisäpintaan 160 mm, 66 mm leveä teräsrankarunko ja kipsilevy. Rakenne toteutettiin sijoittamalla teräsrankarunko irti betonirakenteesta. Ratkaisu mahdollisti yhtenäisen ilmatiiviin eristekerroksen ruiskutuksen betonirakenteen pintaan ja samalla vältettiin kylmäsiltojen muodostuminen. Laskennat suoritettiin rakenteen ulkoilmaa vasten olevalta kohdalta, jolloin ulkopuolisen maan, sekä veden- ja lämmöneristeiden vaikutus jätettiin laskennassa huomioon ottamatta. Tarkastelut tehtiin betonin sisäpinnasta (tarkastelupiste 1) ja kipsilevyn ulkopinnasta (tarkastelupiste 2). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.5.1.



Kuva 6.5.1. Ulkoseinärakenne 6, pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Tarkastelupisteessä 1 suhteellinen kosteus nousee lähes 100 %:iin molempien testivuosien ilmastossa ja rakenteeseen alkaa tiivistyä kosteutta. Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa myös homeindeksi ylittää hyväksyttävänä pidetyn raja-arvon ($M < 1$) tarkastelupisteessä 1. Tarkastelupisteessä 2 ei kummankaan testivuoden ilmastossa esiinny homeenkasvulle otollisia olosuhteita eikä kosteuden tiivistymistä. Taulukossa 6.5.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyyssuokat.

Taulukko 6.5.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyyssuokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US6.

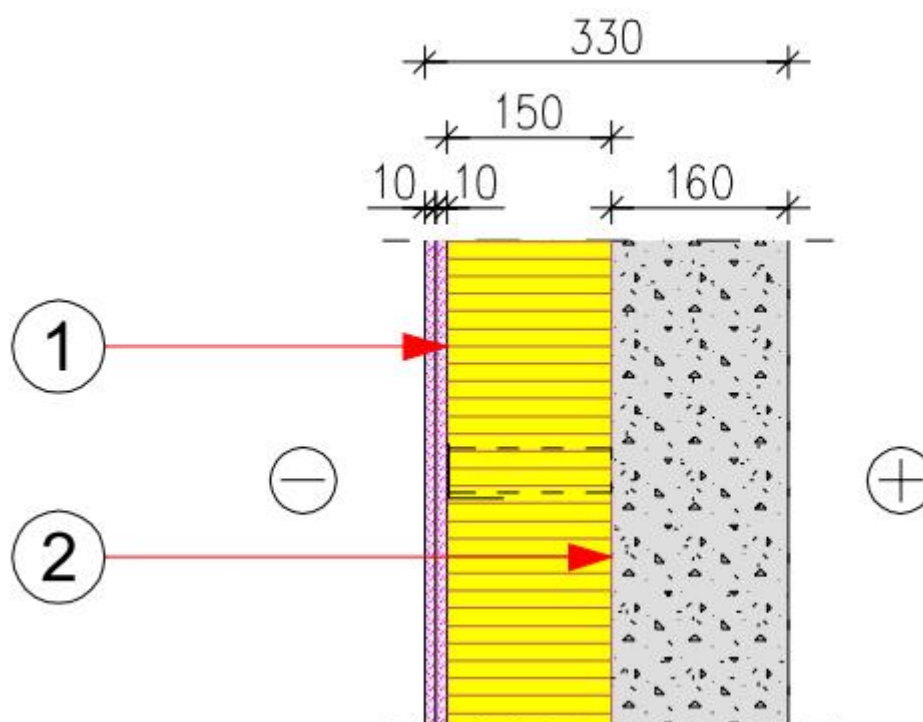
| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Betoni | 3 | 0,86 | 98,86 | 1.23 | 99,30 |
| 2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 74,03 | 0.00 | 76,83 |

Ruiskutettava Ekospray eriste muodostaa riittävän vesihöyrynvastuksen sisäilmasta diffuusiolla siirtyvää kosteutta vastaan. Ulkoilmasta viistosateen vaikutuksesta betoniin imeytyvä kosteus pääsee kuitenkin siirtymään rakenteen sisäosaa kohti kapillaarisesti. Eristekerroksen vesihöyrynvastus estää rakennetta kuivumasta sisälle päin. Samalla betonin lämpötila laskee sisäpuolisen eristyksen vaikutuksesta. Lämpötilan alenemisen seurauksena suhteellinen kosteus nousee ja luo homeenkasvulle otolliset olosuhteet. Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa suhteellinen kosteus ehti tasoittua kolmen vuoden

pituisen laskenta jakson aikana, eikä noussut taulukossa olevaa arvoa korkeammaksi. Jokioisten 2004 testivuoden ilmastossa suhteellinen kosteus sen sijaan ei ehtinyt tasoitua kolmen vuoden laskenta-ajan aikana. Sen perusteella voidaan olettaa, että myös Jokioisten 2004 ilmastossa suhteellinen kosteus vielä nousee ja homeindeksi ylittää jossain vaiheessa arvon yksi.

6.6 Korjattu 70-luvun betonisandwich-elementti seinä

Ulkoseinärakenteessa US7 (ks. liite 2 ja kuva 6.6.1), vanhasta sandwich-elementtiseinästä, US7V (ks. liite 2) poistettiin betoninen ulkokuori ja vanhat lämmöneristeet. Vanha rakenne on Rakennustieto Oy:n julkaisusta, *Kerrostalot 1960 – 1975* [8]. Laskentamallissa rakenteeseen lisättiin ulkopuolelle 150 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä ja teräskoolausta. Eristekerroksen päälle tuli sementtipohjainen rappauslevy ja sen pintaan vettä hylkivä ohutrappaus pinnoite. Rakenne toteutettiin ilman lämmöneristeen ja rappauslevyn välissä olevaa tuuletusväliä. Tarkastelut tehtiin lämmöneristekerroksen ulkopinnasta (tarkastelupiste 1) ja betonin ulkopinnasta (tarkastelupiste 2). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.6.1.



Kuva 6.6.1. Ulkoseinärakenne 7, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

Lämmöneristeen ulkopinnassa (tarkastelupiste 1) suhteellinen kosteus nousee korkeaksi molemmissa testi-ilmastoissa, mutta kosteuden tiivistymistä tai homeenkasvua ei kuitenkaan esiinny. Lämmöneristeen sisäpinnassa (tarkastelupiste 2) suhteellinen kosteus pysyy alhaisena, eikä homeenkasvua laskelmien mukaan esiinny. Taulukossa 6.6.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

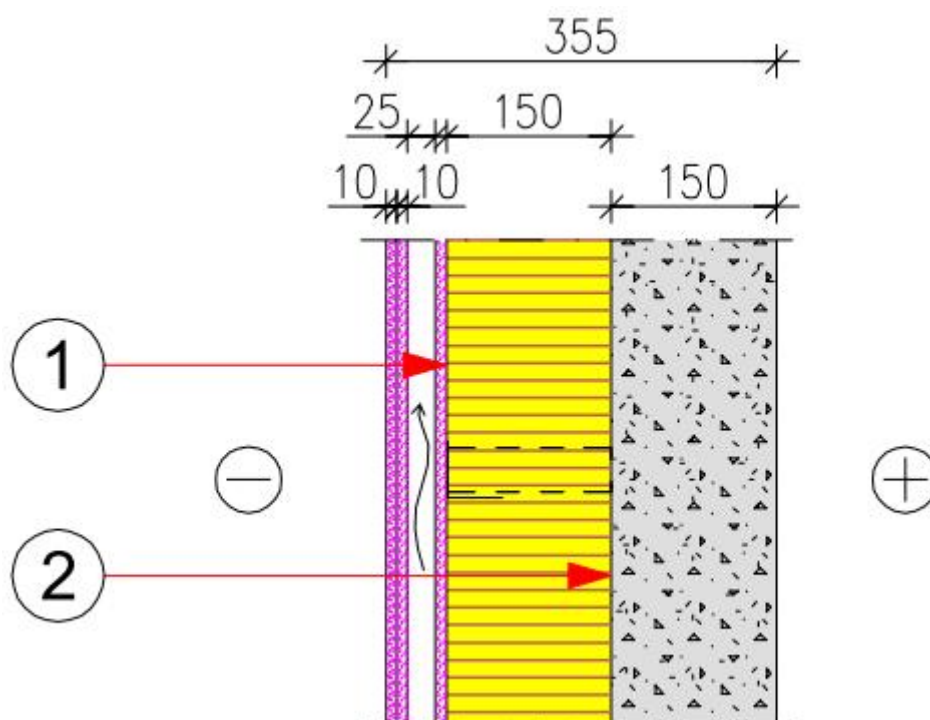
Taulukko 6.6.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US7.

| Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | PUR | 3 | 0,01 | 94,52 | 0.02 | 95,14 |
| 2 | Betoni | 3 | 0,00 | 58,02 | 0.00 | 58,20 |

Ulkopuolen tiiviit kerrokset, ohutrappaus ja ruiskutettu Ekospray eriste estävät viistosateen aiheuttaman kosteuden siirtymisen ulkoa rakenteeseen. Samalla ulkopuolelle asennettu lämmöneriste nostaa betonin ulkopinnan lämpötilaa, jonka seurauksena myös suhteellinen kosteus pysyy alhaisena. Betonirakenne muodostaa myös riittävän vesihöyryn-vastuksen sisäilmasta diffuusiona siirtyvää kosteutta vastaan, eikä eristeen ja betonin rajapintaan muodostu näin ollen homeenkasvulle otollisia olosuhteita eikä kosteuden tiivistymisestä rakenteeseen ole vaaraa. Rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta on erityisen tärkeää miettiä ja suunnitella liitoskohtien toiminta, jotta rappauksen taakse ei pääse vuotamaan sadevettä.

6.7 50-luvun paikalla valetun kerrostalon korjattu betoni-seinä

Betoniseinä rakenne US8 (ks. liite 2 ja kuva 6.7.1) toteutettiin vastaavalla rappausjärjestelmällä ja lämmöneristyksellä kuin ulkoseinä rakenne US7. Laskentamallissa rakenteeseen lisättiin rappauslevyn taakse tuuletusväli ja palomääräysten edellyttämä erillinen palonsuojalevy. Alkuperäisenä rakenteena oli 50-luvulla rakennetun paikalla valetun betonikerrostalon ulkoseinä rakenne (ks. liite 2). Vanha rakenne on Rakennustieto Oy:n julkaisusta, *Kerrostalot 1880 – 2000* [9]. Tarkastelut tehtiin ruiskutettavan Ekospray-eristeen ulkopinnasta (tarkastelupiste 1) ja betonin ulkopinnasta (tarkastelupiste 2). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.7.1.



Kuva 6.7.1. Ulkoseinärakenne 8, vaakaleikkaus ja tarkastelupisteet.

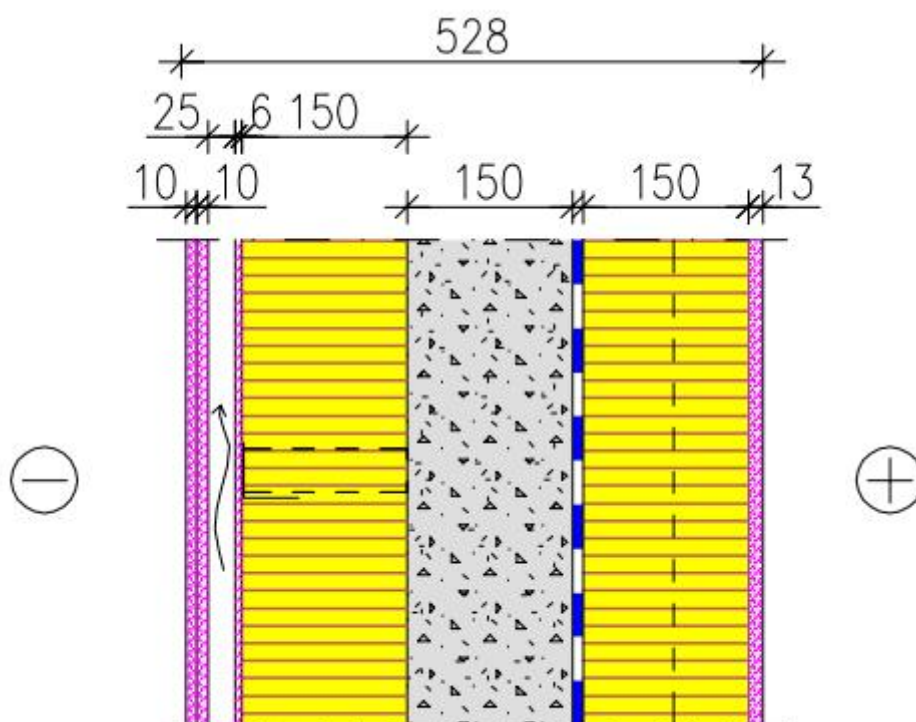
Suhteellisen kosteuden arvot laskevat lämmöneristeen ulkopinnassa (tarkastelupiste 1) verrattuna tuuletusraottomaan ratkaisuun (US7). Tuuletusraon lisäämisellä ei ole merkittävää vaikutusta rakenteen sisäosan kosteuspitoisuuksiin (tarkastelupiste 2). Rakenteessa ei laskelmien mukaan esiinny kosteuden tiivistymistä tai homeenkasvua. Taulukossa 6.7.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homeutumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.7.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homeutumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteessa US8.

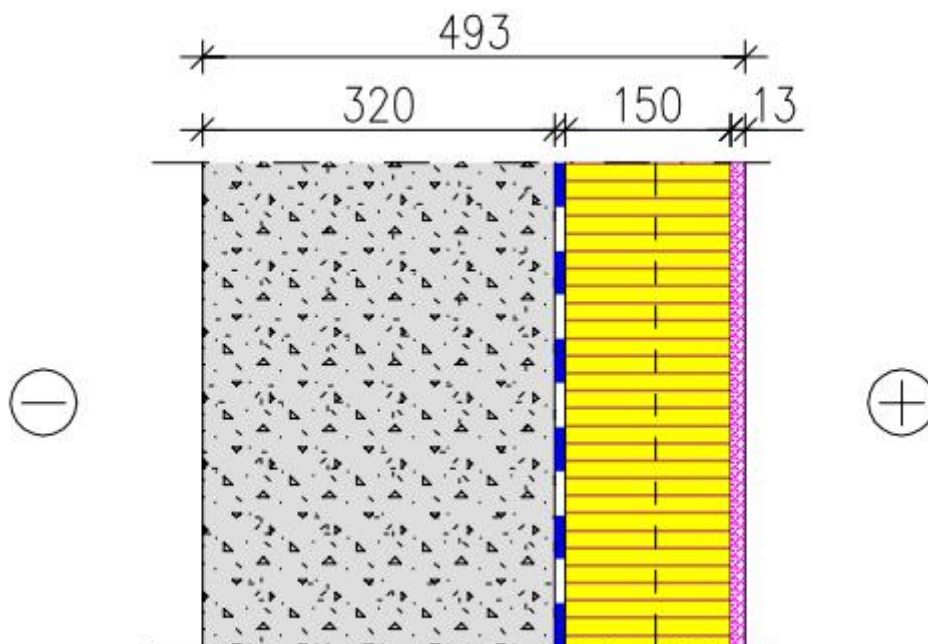
| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | PUR | 3 | 0,00 | 92,10 | 0.07 | 91,53 |
| 2 | Betoni | 3 | 0,00 | 58,20 | 0.00 | 57,25 |

6.8 50-luvun paikalla valetun kerrostalon korjattu kellarin seinä

50-luvun paikalla valetun kerrostalon korjatusta kellarinseinästä tehtiin laskennalliset tarkastelut ulkoilmaa vasten olevasta osasta. Vanha rakenne on Rakennustieto Oy:n julkaisusta, *Kerrostalot 1880 – 2000* [9]. Laskentamallissa alkuperäisestä rakenteesta poistettiin vanha sahajauhottiilimuuraus ja vanha lastuvillalevy eriste (US8V ks. liite 2). Seinän yläosassa lisättiin ruiskutettavaa Ekospray eristettä 150 mm seinän molemmin puolin ja alaosassa seinän sisäpuolelle. Yläosassa eristeen ulkopuoliset rakenteet olivat vastaavat kuin seinärakenteessa US 8 (ks. liite 2 ja kuva 6.7.1). Seinän sisäpuolelle tuli lisäksi kipsilevyverhous. Sisäpuolen rakenne toteutettiin 66 mm leveän kevyen teräsrankarungon avulla. Teräsrankarunko sijoitettiin irti betonirakenteesta. Kuvassa 6.8.1 on esitetty korjatun kellarin seinän yläosa ja kuvassa 6.8.2 alaosa. Laskenta tehtiin ulkoseinän ja välipohjan liittymätarkastelun yhteydessä ja laskentatulokset on esitetty luvussa 6.15.



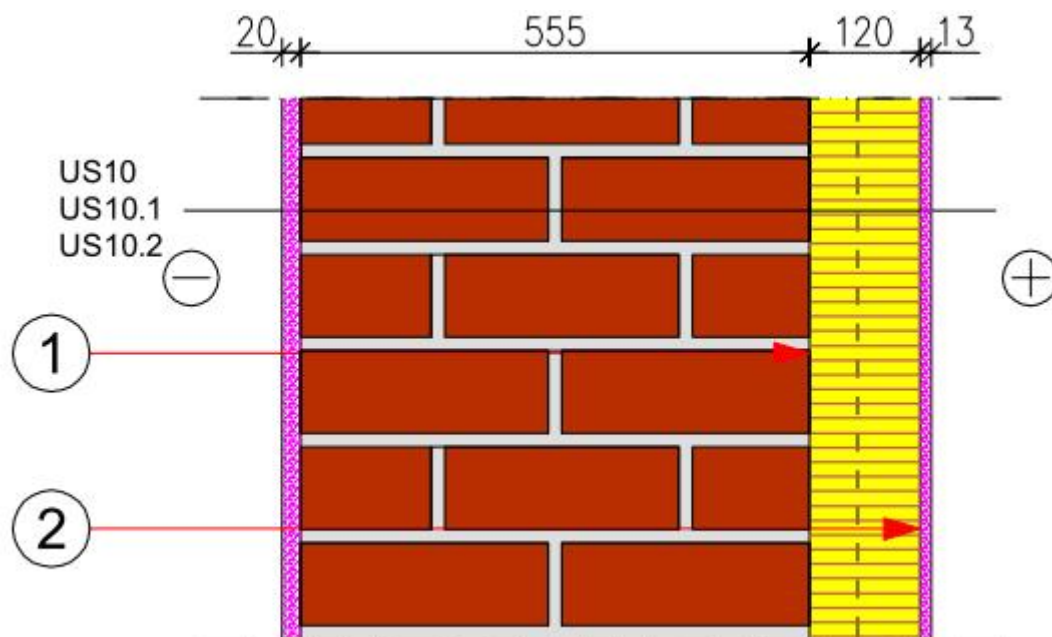
Kuva 6.8.1. Ulkoseinärakenne 9, pystyleikkaus.



Kuva 6.8.2. Ulkoseinärakenne 9.1, pystyleikkaus.

6.9 Sisäpuolelta lisäeristetty massiivitiiliseinä US10, 10.1 ja 10.2

Massiivitiiliseinäarakenteesta tehtiin kolme eri rakennetarkastelua (ks. liite 2 ja kuva 6.9.1). Laskentamallissa ulkoseinäarakenteeseen lisättiin sisäpuolelle 120 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä ja kipsilevyverhous. Sisäpuolen rakenne toteutettiin 66 mm leveän kevyen teräsrunkarungon avulla. Teräsrunkarunko sijoitettiin irti tiilirakenteesta kylmäsiltojen välttämiseksi. Tarkastelut tehtiin tiilirakenteen sisäpinnasta (tarkastelupiste 1), ja kipsilevyn ulkopinnasta (tarkastelupiste 2). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.9.1. Rakenteen alkuperäinen malli on Rakennustieto Oy:n julkaisusta, *Kerrostalot 1880 – 2000* [9].



Kuva 6.9.1. Ulkoseinärakenteiden 10, 10.1 ja 10.2 pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Rappaamattomassa massiivitiilirakenteessa (US10) ja kalkki-/sementtilaastilla tehdyssä kolmikerrosrappaus seinärakenteessa (US10.1) suhteellinen kosteus nousee Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa tarkastelupisteessä 1 tasolle, jossa alkaa tapahtua kosteuden tiivistymistä. Homeindeksi on myös selvästi yli hyväksyttävänä pidetyn raja-arvon ($M < 1$) molemmissa seinärakenteissa. Vastaavasti Jokioisten 2004 testivuoden ilmastossa suhteellinen kosteus on korkealla, mutta kosteuden tiivistymistä ei tapahdu eikä homeindeksi nouse yli yhden. Vettä hylkivällä pinnoitteella käsitellyssä rapatussa seinärakenteessa (US10.2) vastaavassa tarkastelupisteessä suhteellinen kosteus ja homeindeksi ovat selvästi alhaisemmat molempien testivuosien ilmastoissa. US10.2 seinärakenteessa ei tapahdu kosteuden tiivistymistä, eikä homeindeksi nouse yli hyväksyttävän raja-arvon. Lämmöneristeen ja kipsilevyn rajapinnassa (tarkastelupiste 2) ei tapahdu kosteuden tiivistymistä, eikä homeindeksi nouse yli hyväksyttävän raja-arvon millään tarkastelluista rakenteista. Taulukossa 6.9.1 on esitetty homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot tarkastelupisteissä sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.9.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin rakenteissa US10/US10.1/ US10.2.

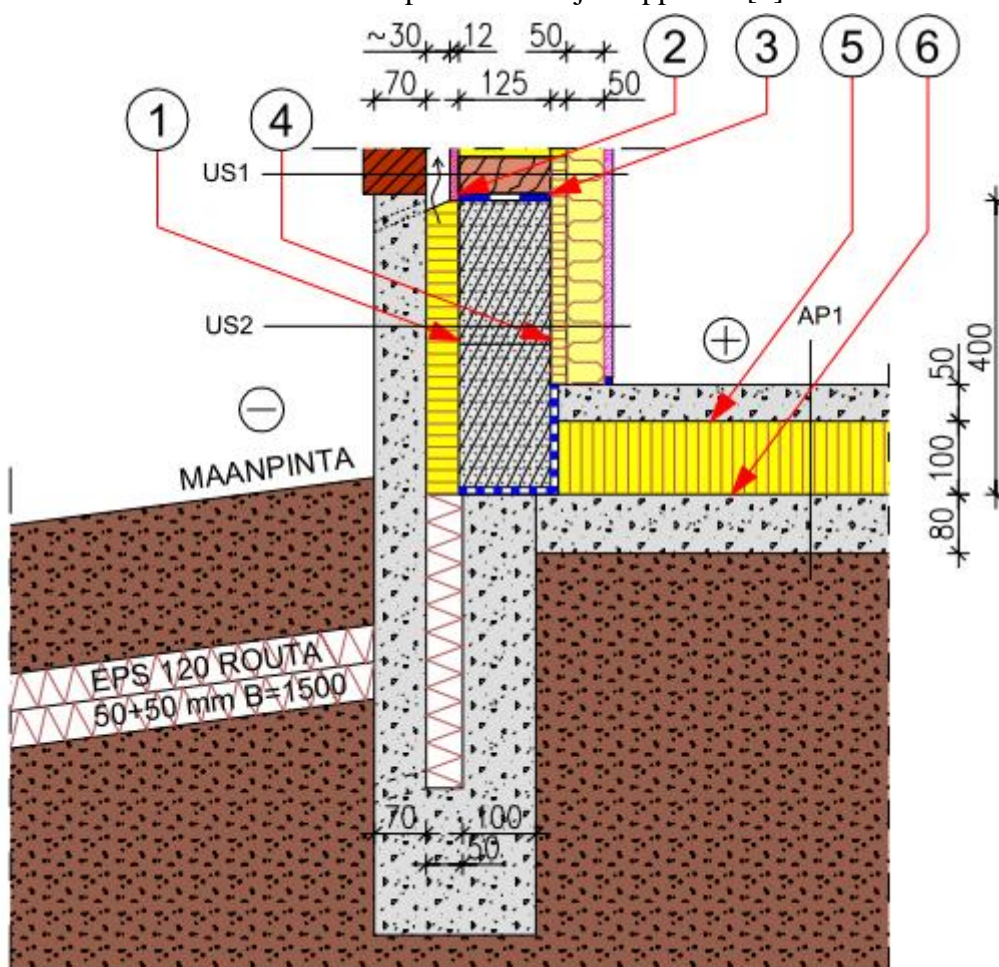
| Rakenne/ Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| US10/1 | Tiili | 3 | 0,51 | 96,94 | 2,35 | 99,94 |
| US10/2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 73,78 | 0,00 | 77,01 |
| US10.1/1 | Tiili | 3 | 0,82 | 97,60 | 2,11 | 99,99 |
| US10.1/2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 73,97 | 0,00 | 77,30 |
| US10.2/1 | Tiili | 3 | 0,13 | 88,96 | 0,08 | 88,02 |
| US10.2/2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 74,34 | 0,00 | 77,16 |

Viistosaderasitus nostaa selvästi seinän suhteellista kosteutta rakenteissa US10 ja US10.1, joiden pinnassa ei ole veden imeytymistä estävää silikonihartsipinnoitetta (ks.liite 1). Rakenteeseen imeytynyt vesi pääsee siirtymään kapillaarisesti rakenteen sisäosiin. Viistosateen aiheuttama rasitus on havaittavissa erityisesti Vantaan 2007 testivuoden ilmastossa tehdyissä tarkasteluissa, joissa tarkastelu suuntana on etelä ja viistosaderasitus voimakkaampaa. eristeen lisääminen massiivitiilirakenteen sisäpuolelle alentaa lämpötilaa tiilirakenteen sisäpinnassa, jonka seurauksena suhteellinen kosteus tiilirakenteen ja lämmöneristeen rajapinnassa nousee. Samalla sisäpinnan korkea vesihöyrynvastus estää rakenteen kuivumisen sisälle päin. Ulkoseinärakenteissa US10 ja US10.1 kosteus määrä lisääntyi jokaisen tarkasteluvuoden aikana. Ulkoseinärakenteessa US10.2 lähtöarvoksi määritetty 90 %:n RH puolestaan laski tasaisesti suoritettujen laskentavuosien aikana, huolimatta rakenteen korkeasta ulko- ja sisäpinnan vesihöyrynvastuksesta. US10.2 rakenteen toimivuutta pitkäaikaisesti ei voida tämän tutkimuksen perusteella varmistaa.

6.10 70-luvulla rakennetun pientalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitos (Rakenne 1)

Laskentamallissa 70-luvulla rakennetun pientalon valesokkelin kohdalla ulkoseinärakenteen alaosan kantava puurunko korvattiin kahdella 200x125 mm² kevytsoraharkolla. Harkon ala- ja yläpintaan mallinnettiin kapillaarisen vedennousun estävä bitumihuopa-kaista. Vanhan valesokkelin ja harkkorakenteen väli täytettiin ruiskutettavalla Ekospray eristeellä. Harkon sisäpuoli eristettiin mineraalivillalla. Alapohjarakenteen vanhat eristeet, puukoolaus ja puulattia korvattiin ruiskutettavalla Ekospray eristeellä ja uudella pintabetonilaatalla (ks. liite 4 ja kuva 6.10.1). Tarkastelut tehtiin seinärakenteessa uuden alaohjauspuun sisä- ja ulkopinnasta (tarkastelupisteet 2 ja 3), harkkorakenteen ulko- ja sisäpinnasta (tarkastelupisteet 1 ja 4), sekä lattiarakenteessa lämmöneristeen molemmiin puolin betonin pinnasta (tarkastelupisteet 5 ja 6). Rakenne ja tarkastelupisteet on esitetty

kuvassa 6.10.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4. Alkuperäinen rakenneratkaisu on 70-luvun pientalon korjausoppaasta [6].



Kuva 6.10.1. 70-luvun pientalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Tarkastelupisteistä uuden pintabetonilaatan ja lattiassa olevan eristeen rajapinnassa (tarkastelupiste 5) ei synny homeen kasvulle otollisia olosuhteita. Muissa tarkastelupisteissä homeindeksi ylittää selvästi arvon 1,0. Kosteuden tiivistymistä ei tarkastelupisteissä tapahdu. Taulukossa 6.10.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.10.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin kuvan 6.10.1 liitoksessa.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Kevytsora-betoni | 1 | 1,36 | 93,84 | 1,44 | 94,98 |
| 2 | Puu | 1 | 4,58 | 93,06 | 4,58 | 93,06 |
| 3 | Puu | 1 | 4,32 | 93,32 | 4,98 | 94,77 |
| 4 | Kevytsora-betoni | 1 | 1,44 | 93,70 | 1,59 | 94,94 |
| 5 | Betoni | 1 | 0,00 | 74,76 | 0,00 | 77,81 |
| 6 | Betoni | 1 | 2,34 | 98,91 | 2,35 | 99,14 |

Harkkorakenteen kohdalla (tarkastelupisteet 1 ja 4) sisäilmasta pääsee diffuusiolla siirtymään kosteutta rakenteeseen. Rakenteen kohdalla oleva tiivis ulkopinta estää rakennetta kuivumasta ulospäin ja suhteellinen kosteus nousee korkeaksi harkkorakenteessa. Alaohjauspuun kohdalla (tarkastelupiste 2) on havaittavissa sama tilanne, kuin ulkoseinä-rakenteessa yksi. Sisäpuolen lisäeriste heikentää olosuhteita sekä pisteessä 1 että pisteessä 4. Ilman sitä olosuhteet olisivat hyväksyttävällä tasolla näissä kohdissa.

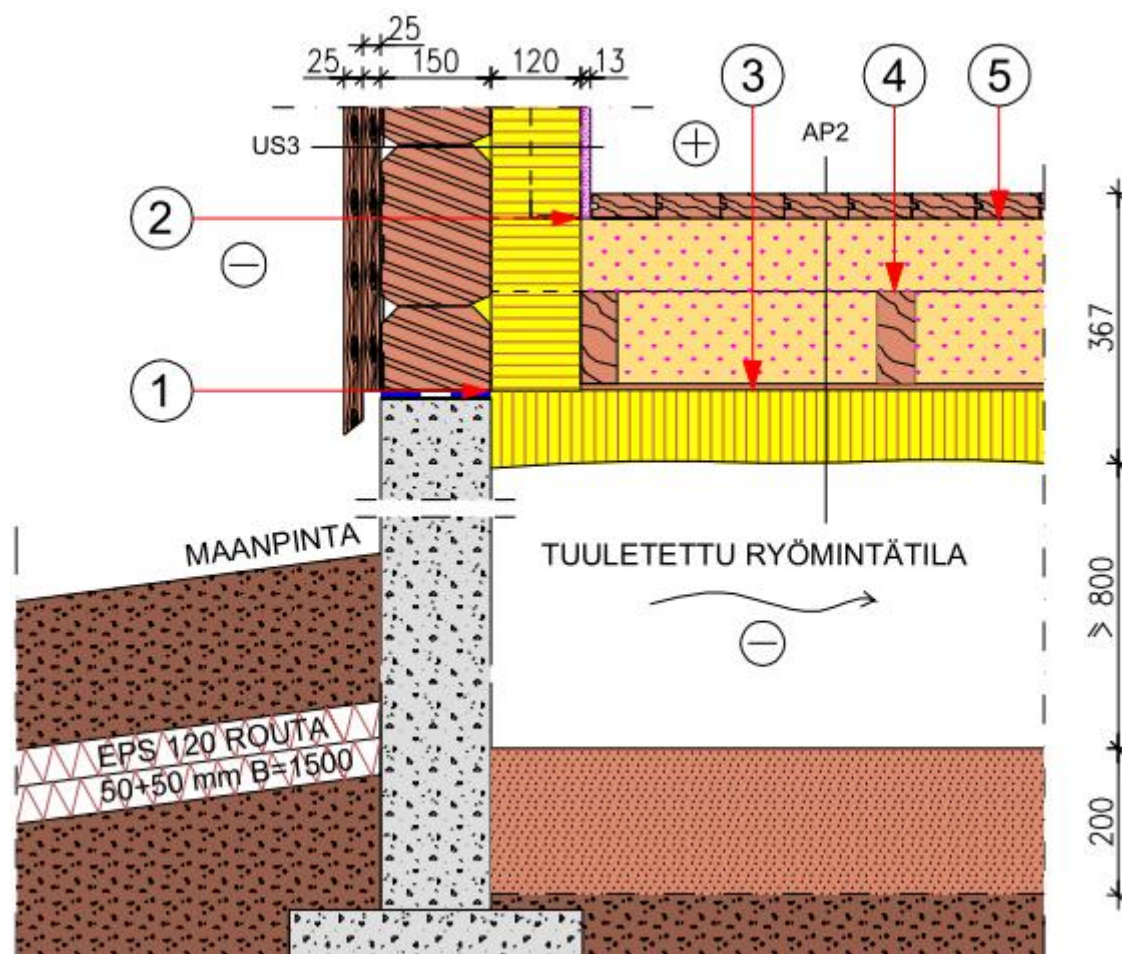
Viistosaderasituksen johdosta tiiliverhoukseen sitoutunut kosteus siirtyy haihtumalla auringon lämmittäessä tuuletusrakoon ja siitä diffuusiona rakenteen sisäosiin. Vähäinen lämmöneristekerros runkorakenteen ulkopuolella laskee runkorakenteen ulkopinnan lämpötilaa ja yhdessä korkean suhteellisen kosteuden kanssa luo otolliset olosuhteet homeenkasvulle. Tarkastelupisteessä 3 kesäkuukausien aikana suhteellinen kosteus pysyy alle homeenkasvun vaatiman kriittisen kosteuden, eikä homeen kasvulle otollisia olosuhteita esiinny. Lämpötilan lasku kylmien kuukausien aikana nostaa suhteellisen kosteuden arvoa ja lämpötilan pysyessä samalla yli 0 °C, syntyy homeen kasvulle otolliset olosuhteet. Tiiliverhouksen kohdalta ulkoseinän olosuhteet eivät ole hyväksyttävät. Rakenteen turvallinen korjaus edellyttää tiiliverhouksen purkua ja puurungon lämmöneristämistä ulkoapäin.

Tarkastelupisteessä 6 maaperästä kapillaarisesti siirtyvä kosteus pitää vanhan betonilaatan suhteellisen kosteuden jatkuvasti lähellä 100 % RH:ta ja homeindeksi nousee yli kahden. Koska kuvassa oikein toteutetussa alapohjarakenteessa lämmöneristeen alapinta olisi maata vasten ja siten hyväksyttävä homeindeksi olisi tässä kohdassa suurempi kuin 1,0, niin myös korjatussa rakenteessa voidaan hyväksyä suurempi homeindeksin arvo tässä kohdassa, vaikka lämmöneriste rajoittuukin tässä alapuoliseen betonilaattaan.[18]

Vanhan laatan yläpuolella oleva tiivis Ekospray estää kosteuden siirtymisen yläpuoliseen laattaan, eikä eristekerroksen ja yläpuolisen pintabetonilaatan rajapinnassa (tarkastelupiste 5) esiinny homeen kasvulle otollisia olosuhteita.

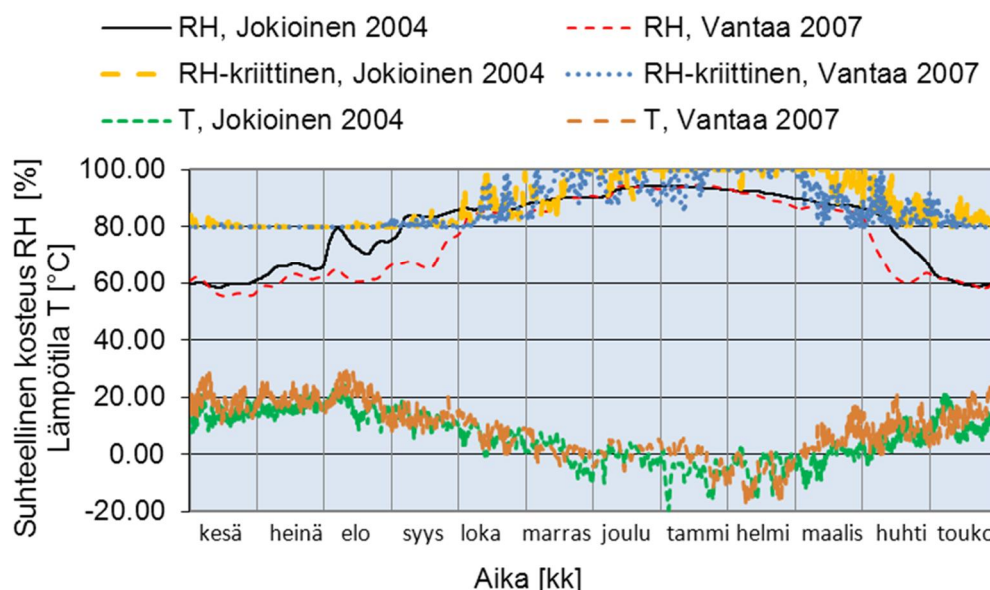
6.11 Hirsirunkoisen ryömintätilaisen pientalon ulkoseinän, perusmuurin, ja alapohjan liitos (Rakenne 2)

Hirsirunkoisen ryömintätilaisen pientalon laskentamallissa ulkoseinään mallinnettiin ruiskutettava Ekospray eriste sokkelin ja ulkoseinän rajapintaan saakka. Alapohjan alapintaan mallinnettiin 100 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä ja alapohjapalkiston väleissä käytettiin puukuitueristettä. Ruiskutettava Ekospray eristys toteutettiin jatkuvana seinä- ja alapohjarakenteen kohdalla. Tarkastelut tehtiin alapohjarakenteen kohdalla ulkoseinään lisätyn lämmöneristeen sisä- ja ulkopuolelta puun pinnasta (tarkastelupisteet 1 ja 2), alapohjassa lämmöneristeen sisäpuolelta vanerin pinnasta (tarkastelupiste 3), alapohjapalkista (tarkastelupiste 4) ja lattialaudoituksen alapinnasta (tarkastelupiste 5). Rakenne ja tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.11.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4. Rakenteen alkuperäinen malli on kirjasta *Perin-nemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito* [11]. Kuvassa 6.11.1 esitetyssä ratkaisussa reunimmainen lattiavasa on siirretty hirsiseinärakenteesta irti. Alkuperäisessä rakenteessa lattiavasa on kiinni hirsiseinärakenteessa. Jos lattiavasa jätetään alkuperäiseen paikkaan ja lisäeristys tehdään ainoastaan lattiarakenteen alapuolelle saattaa alanurkan kosteusolosuhteet muodostua homeenkasvun kannalta kriittisiksi.



Kuva 6.11.1. Hirsirunkoisen ryömintätilaisen pientalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Tarkastelupisteessä yksi ulkoseinän ja alapohjan lämmöneristys vähentää lämmönjohtumista sisätiloista alimman hirren ja sokkelirakenteen liitoskohtaan. Eristämätön perusmuuri pitää samalla liitoskohdan kylmänä. Alhaisen lämpötilan seurauksena suhteellinen kosteus nousee rajapinnassa talvikuukausina yli 90 % RH arvon. Alhainen lämpötila nostaa kuitenkin samalla homeenkasvun mahdollistavan kriittisen suhteellisen kosteuden arvoa, jonka seurauksena homeen kasvulle otollisia olosuhteita pääsee syntymään vain hetkellisesti ja homeindeksi jää selvästi alle yhden. Kuvasta 6.11.2 nähdään kuinka RH nousee lämpötilan laskiessa ja kuinka lämpötilan lasku vaikuttaa samalla homeen kasvun mahdollistavan kriittisen RH arvon muodostumiseen.



Kuva 6.11.2. Tarkastelupisteen 1 lämpötilat, suhteelliset kosteudet ja kriittiset suhteelliset kosteudet eri testivuosina kuvan 6.11.1 liitokohdassa.

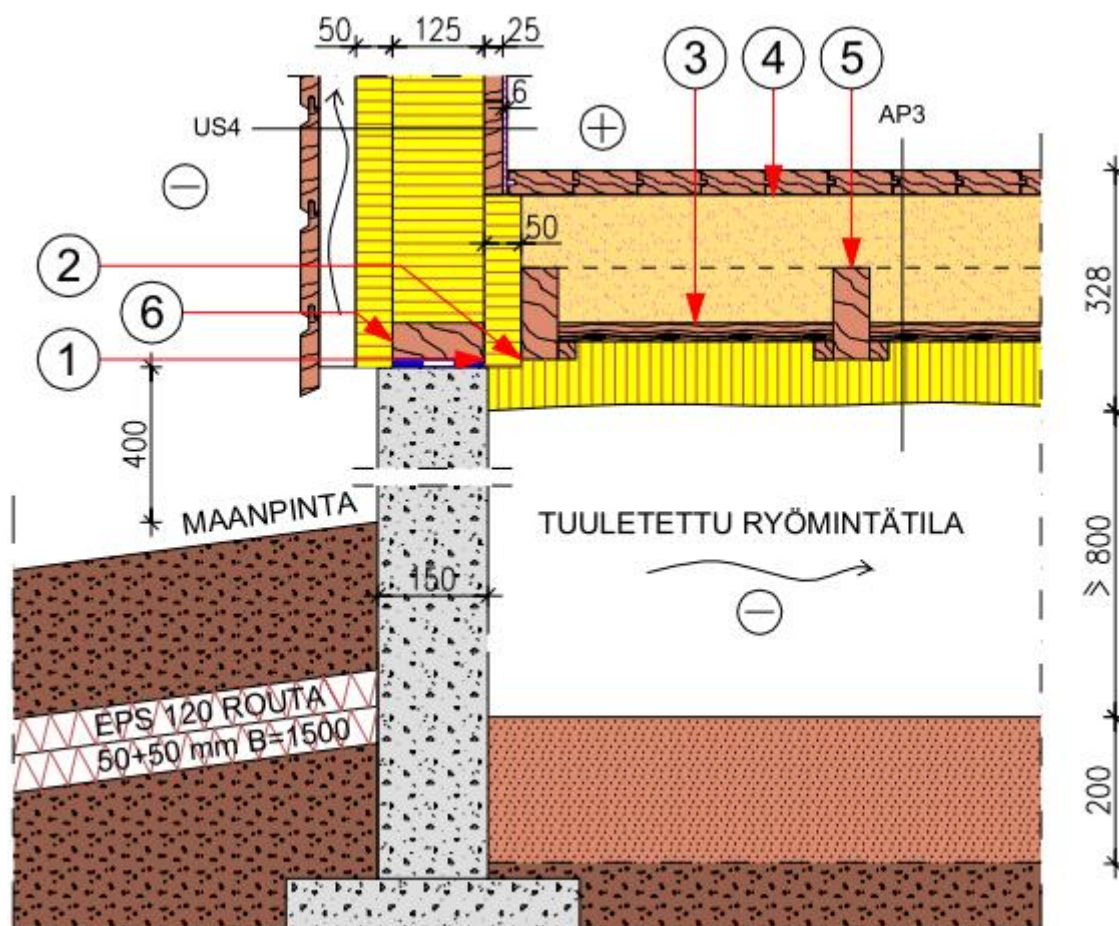
Tarkastelupisteissä 2, 4 ja 5 suhteellinen kosteus pysyy läpi vuoden alhaisena, eikä homeenkasvua esiinny. Tarkastelupisteessä 3 Ekospray-eristeen muodostama tiivis ulkopinta rajoittaa lattiarakenteeseen huoneilmasta diffuusiolla siirtyvän kosteuden pääsyä rakenteen läpi, mikä nostaa rakenteen kosteuspitoisuutta. Alapohjapalkkien väleissä käytetty puukuitueriste pystyy suuren kosteudensitomiskapasiteettinsa (n.15 kg/m³, kun RH ≈ 97 %) ansiosta sitomaan itseensä diffuusiolla siirtyvää kosteutta, eikä kosteuden tiivistymistä pääse tapahtumaan. Ulkopuolinen Ekospray nostaa rakenteen sisäosien lämpötilaa, mikä myös pienentää suhteellista kosteutta rakenteen sisäosissa. Taulukossa 6.11.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.11.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin kuvan 6.11.1 liitoksessa.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,31 | 94,34 | 0.26 | 94,88 |
| 2 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 64,85 | 0.00 | 66,39 |
| 3 | Puu | 1 | 0,48 | 82,79 | 0.09 | 81,11 |
| 4 | Puu | 1 | 0,00 | 67,62 | 0.00 | 68,62 |
| 5 | Puu | 1 | 0,00 | 58,42 | 0.00 | 61,20 |

6.12 Ryömintätilaisen rintamamiestalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitos (Rakenne 3)

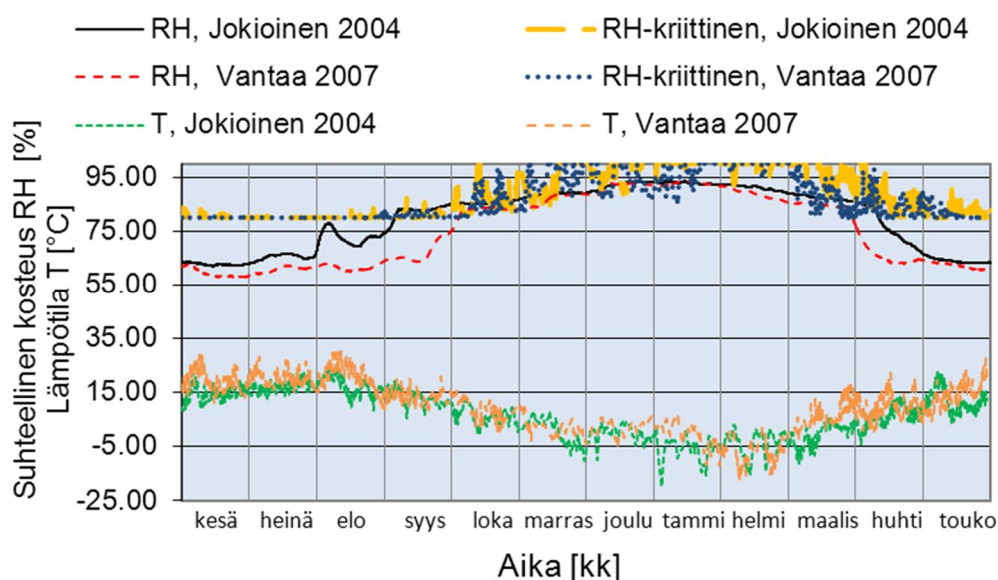
Ryömintätilaisen rintamamiestalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liittymätarkastelussa ulkoseinärakenteena käytettiin luvussa 6.4 käsitellyä korjattua ulkoseinärakennetta US4 (ks. kuva 6.4.1). Laskentamallissa ulkoseinärakenteeseen lisättiin vanhan välipohjan kohdalle ruiskutettavaa Ekospray eristettä 50 mm ja alapohjan alapintaan 100 mm. Alapohjapalkiston välissä oleva eristekerros (sahanpuru) pidettiin ennallaan. Ekospray eristys tehtiin jatkuvana seinä- ja alapohjarakenteen kohdalla. Alkuperäinen rakenne oli vastaava kuin kohdassa 6.11 (ks. liite 3). Tarkastelut tehtiin ulkoseinän alaohjauspuun ulko- ja sisäpinnasta (tarkastelupisteet 6 ja 1), alapohjapalkin alapinnasta (tarkastelupiste 2), vanhan rossilaudoituksen yläpinnasta (tarkastelupiste 3), vanhan lattialaudoituksen alapinnasta (tarkastelupiste 4) ja vanhan alapohjapalkin yläpinnasta (tarkastelupiste 5). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.12.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4.



Kuva 6.12.1. Ryömintätilaisen rintamamiestalon ulkoseinän, perusmuurin ja ryömintätilaisen alapohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Tarkastelupisteessä 1 ulkoseinän ja alapohjan lämmöneristys vähentää lämmön johtumista sisätiloista alaohjauspuun ja perusmuurin liitoskohtaan. Eristämätön perusmuuri

pitää samalla liitoskohdan kylmänä. Alhaisen lämpötilan seurauksena suhteellinen kosteus nousee rajapinnassa talvikuukausina yli 90 % RH arvon. Alhainen lämpötila nostaa kuitenkin samalla homeenkasvun mahdollistavan kriittisen suhteellisen kosteuden arvoa, jonka seurauksena homeen kasvulle otollisia olosuhteita pääsee syntymään vain hetkellisesti ja homeindeksi jää selvästi alle yhden. Kuvasta 6.12.2 nähdään kuinka RH nousee lämpötilan laskiessa ja kuinka lämpötilan lasku vaikuttaa samalla homeen kasvun mahdollistavan kriittisen RH arvon muodostumiseen. Kuvassa 6.12.1 esitettyssä ratkaisussa reunimmainen lattiavasa on siirretty hirsiseinärakenteesta irti. Alkuperäisessä rakenteessa lattiavasa on kiinni hirsiseinärakenteessa. Jos lattiavasa jätetään alkupe-
räiseen paikkaan ja lisäeristys tehdään ainoastaan lattiarakenteen alapuolelle saattaa alanurkan kosteusolosuhteet muodostua homeenkasvun kannalta kriittisiksi.



Kuva 6.12.2. Tarkastelupisteen 1 lämpötilat, suhteelliset kosteudet ja kriittiset suhteelliset kosteudet eri testivuosilta kuvan 6.12.1 liitoskohdassa.

Tarkastelupisteissä 2 - 6 ei esiinny homeenkasvua tai kosteuden tiivistymistä. Taulukossa 6.12.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

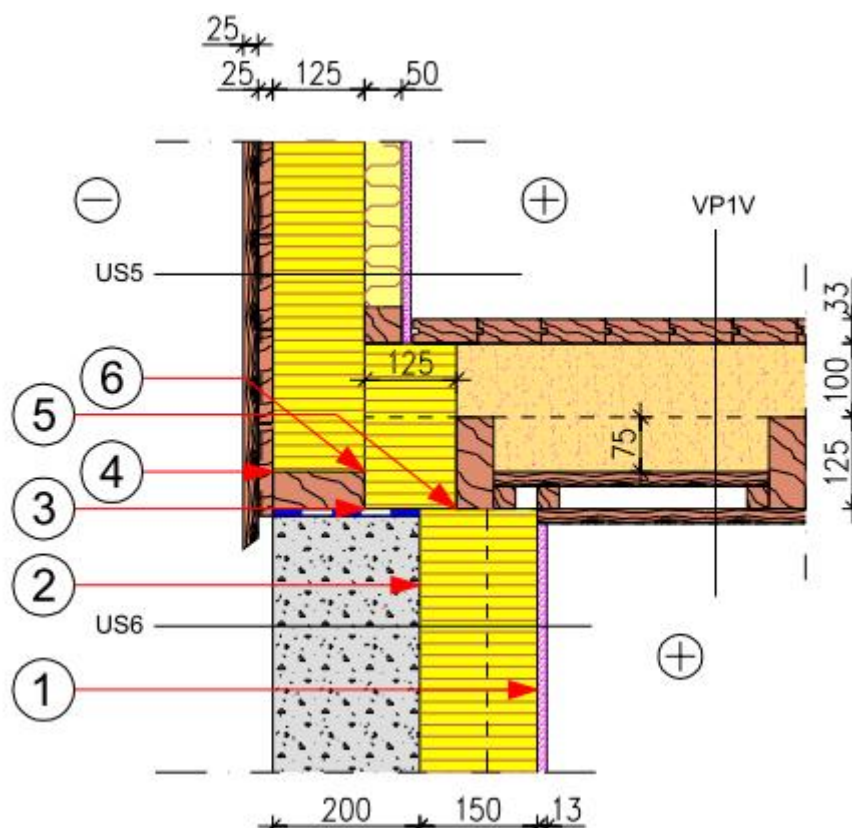
Taulukko 6.12.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin kuvan 6.12.1 liitoksessa.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Puu | 1 | 0,25 | 93,68 | 0.18 | 93,50 |
| 2 | Puu | 1 | 0,00 | 71,97 | 0.00 | 70,98 |
| 3 | Puu | 1 | 0,00 | 70,65 | 0.00 | 71,10 |
| 4 | Puu | 1 | 0,00 | 60,32 | 0.00 | 62,63 |
| 5 | Puu | 1 | 0,00 | 69,47 | 0.00 | 70,16 |
| 6 | Puu | 1 | 0,00 | 78,60 | 0.00 | 75,53 |

Vertailtaessa rakenteiden kaksi ja kolme puurakenteisten alapohjien tarkastelupistettä 3, huomataan selkeä ero suhteellisen kosteuden maksimiarvojen välillä. Rakenteessa kaksi tarkastelupisteen 3 suhteellinen kosteus (RH) on välillä 75 – 83 % läpi vuoden ja rakenteessa kolme välillä 67 – 71 %. Rakenteessa kolme Ekospray eristeen lämpimällä puolella käytetty sahanpurueriste pystyy sitomaan itseensä enemmän kosteutta suuremman kosteudensitomiskapasiteetin ansiosta ja samanaikaisesti huonomman lämmöneristyskyvyn vaikutuksesta tarkastelupisteen lämpötila pysyy korkeammalla. Näiden seurauksena suhteellinen kosteus laskee rakenteessa kolme rakenteeseen kaksi verrattuna.

6.13 Kellarillisen rintamamiestalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 4)

Kellarillisen rintamamiestalon ulkoseinien ja välipohjan liittymätarkastelussa käytettiin luvuissa 6.4 ja 6.5 käsiteltyjä ulkoseinärakenteita US5 ja US6. Laskentamallissa vanhan välipohjarakenteen kohdalle lisättiin ulkoseinälle 125 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä, jolla seinien sisäpuolen lisäeristykset saatiin toteutettua jatkuvana välipohjarakenteen kohdalla (ks. liite 4 ja kuva 6.13.1). Tarkastelut tehtiin kellarinseinässä kipsilevyn sisäpinnasta (tarkastelupiste 1), betonin sisäpinnasta (tarkastelupiste 2), välipohjan kohdalla puurankaseinän alaohjauspuun alapinnan sisäreunasta (tarkastelupiste 3), alaohjauspuun yläpinnan ulko- ja sisäreunasta (tarkastelupisteet 4 ja 6) sekä välipohjapalkin alapinnasta (tarkastelupiste 5). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.13.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4. Alkuperäinen rakenne on kirjasta *Perinnemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito* [11].



Kuva 6.13.1. Kellarillisen rintamamiestalon ulkoseinien ja välipohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

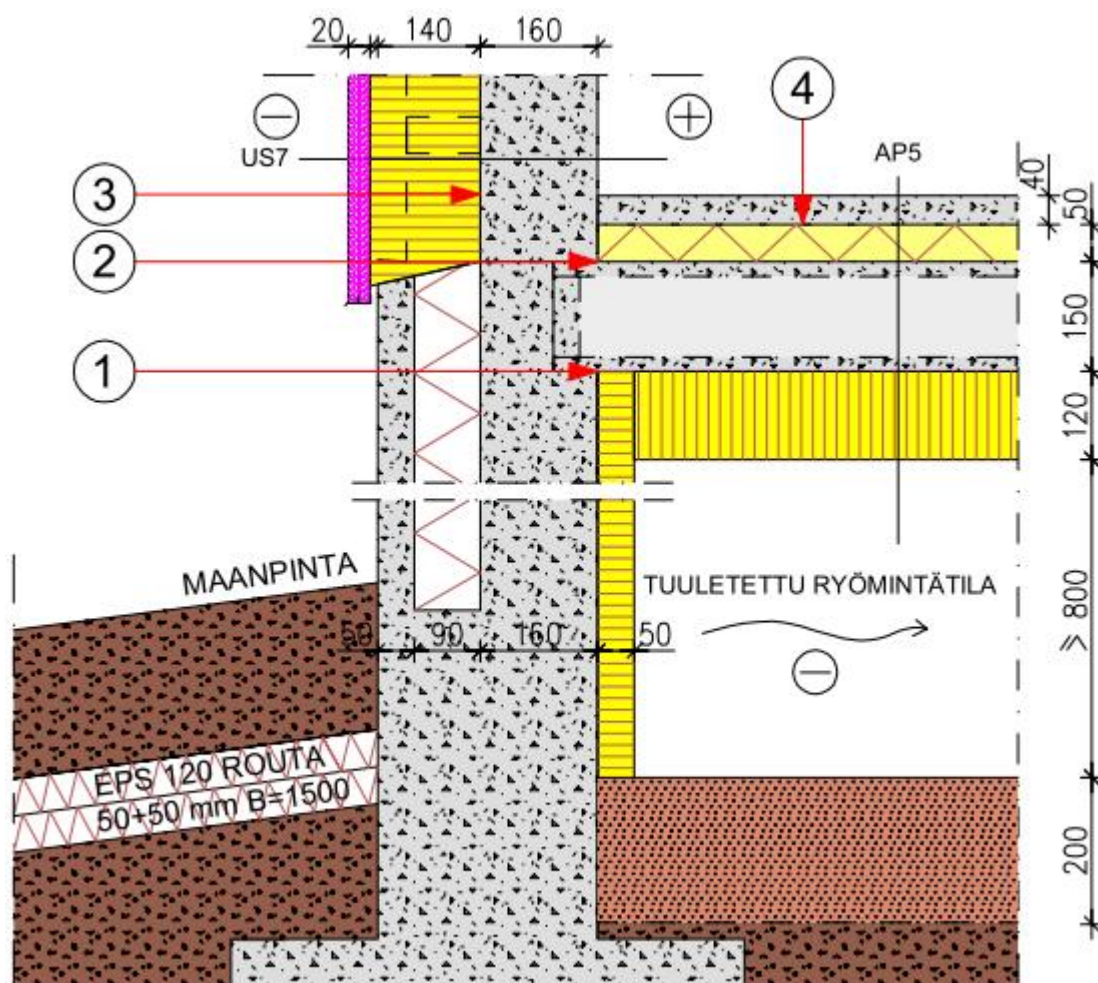
Tarkastelupisteissä 2, 3, 4 ja 6 kosteus ei ehtinyt tasaantua kolmen laskentavuoden aikana, vaan kosteuspitoisuus jatkoi edelleen nousua. Kaikkiin edellä mainittuihin tarkastelupisteisiin kosteus pääsee siirtymään ulkoseinään tapahtuvan viistosateen vaikutuksesta kapillaarisesti. Rakenne pääsee kuivumaan näissä pisteissä Ekospray-eristeen muodostaman korkean vesihöyrynvastuksen vuoksi lähinnä ulospäin. Laskelmat osoittavat, ettei rakenne ehdi kuivua näissä kohdin kuivien kesäkuukausien aikana ja rakenteen kosteuspitoisuus kasvaa edelleen. Näissä tarkastelupisteissä sisäpuolella oleva eristekerros laskee lisäksi rakenteen lämpötilaa, jonka seurauksena suhteellinen kosteus on korkealla. Tarkastelupisteessä kolme myös homeindeksi nousee korkeaksi. Tarkastelupisteissä 1 ja 5 ei esiinny homeen kasvua tai kosteuden tiivistymistä. Taulukossa 6.13.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat. Kuvassa 6.13.1 esitetyssä ratkaisussa reunimmainen lattiavasa on siirretty hirsiseinärakenteesta irti. Alkuperäisessä rakenteessa lattiavasa on kiinni hirsiseinärakenteessa. Jos lattiavasa jätetään alkuperäiseen paikkaan ja lisäeristys tehdään ainoastaan lattiarakenteen alapuolelle saattaa alanurkan kosteusolosuhteet muodostua homeenkasvun kannalta kriittisiksi.

Taulukko 6.13.1. Homeindeksit, suhteellisen kosteuden maksimi arvot ja materiaalien homehtumisherkkyyssuokat tarkastelupisteittäin.

| Tarkastelu piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|---------------------|------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 74.10 | 0.00 | 76,78 |
| 2 | Betoni | 3 | 0,48 | 94.51 | 0.58 | 96,65 |
| 3 | Puu | 1 | 4,51 | 94.55 | 5.24 | 96,73 |
| 4 | Puu | 1 | 0,00 | 76.62 | 0.00 | 75,86 |
| 5 | Puu | 1 | 0,00 | 73.47 | 0.00 | 77,78 |
| 6 | Puu | 1 | 0,76 | 89.72 | 0.99 | 90,62 |

6.14 70-luvun ryömintätilaisen betonirunkoisen pienkerrostalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitos (Rakenne 5)

70-luvun ryömintätilaisen betonirunkoisen pienkerrostalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liittymätarkastelussa käytettiin luvussa 6.6 käsitellyä ulkoseinärakennetta US7. Laskentamallissa vanhan perusmuurin sisäpuolelle lisättiin 50 mm ja vanhan alapohjarakenteen alapintaan 120 mm ruiskutettavaa Ekospray eristettä (ks. liite 4 ja kuva 6.14.1). Tarkastelut tehtiin alapohjan ja sokkelin liitoskohdasta betonin sisäpinnasta (tarkastelupiste 1), vanhan pintalaatan alapuolelta vanhan lämmöneristeen ala- ja yläpinnasta (tarkastelupisteet 2 ja 4) sekä ulkoseinästä betonin ulkopinnasta perusmuurin yläpuolelta (tarkastelupiste 3). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.14.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4. Alkuperäinen rakenne on Rakennustieto Oy:n julkaisusta *Kerrostalot 1960 – 1975* [8].



Kuva 6.14.1. 70-luvun ryömintätilaisen pienkerrostalon ulkoseinän, perusmuurin ja alapohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

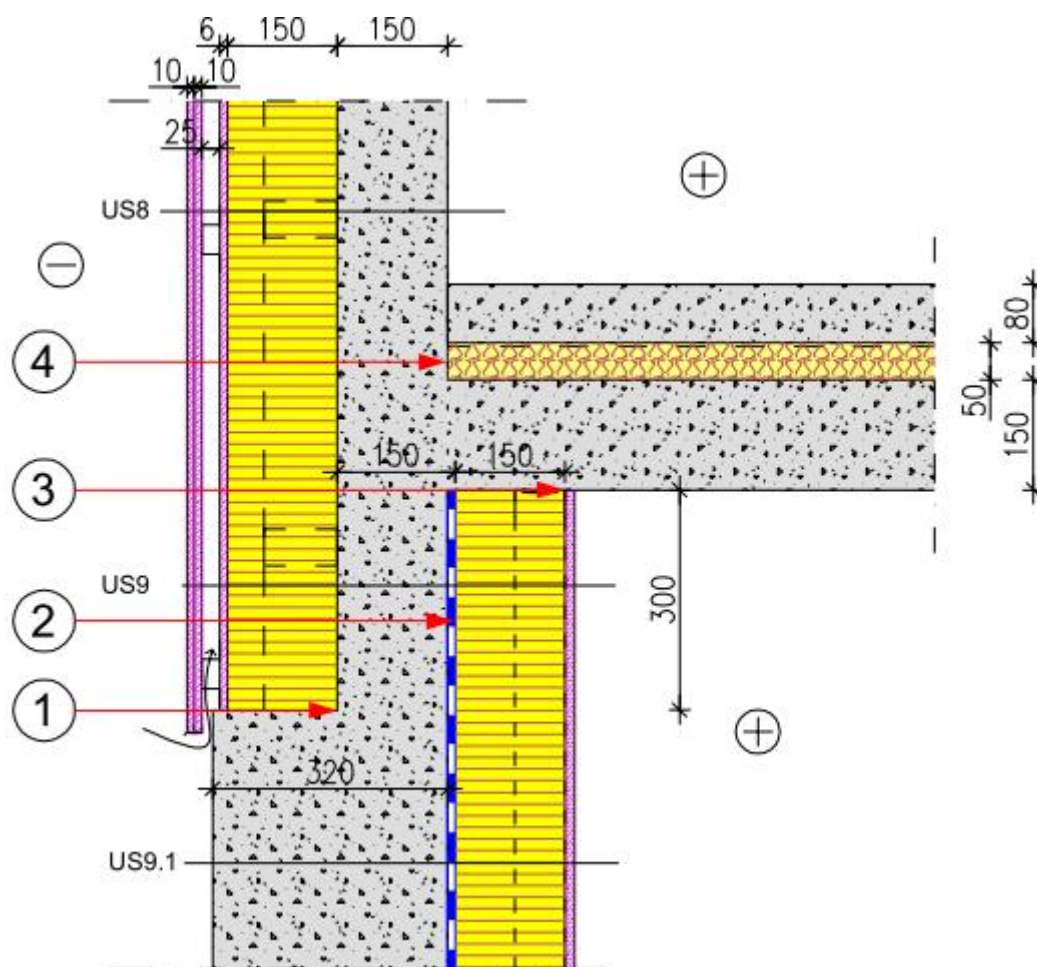
Tarkastelupisteessä yksi suhteellinen kosteus on lähes koko vuoden ajan korkeampi, kuin homeen kasvun mahdollistava kriittinen suhteellinen kosteus (RH 85 %) molemmissa testi-ilmastoissa. Homeindeksi jää kuitenkin selvästi alle yhden, eikä tarkastelupisteessä tapahdu myöskään kosteuden tiivistymistä. Tarkastelupisteissä 2 - 4 suhteellinen kosteus pysyy alle kriittisen suhteellisen kosteuden, eikä kosteuden tiivistymistä tai homeen kasvua esiinny. Taulukossa 6.14.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimi-arvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.14.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin kuvan 6.14.1 liitoksissa.

| Tarkastelupiste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|-----------------|----------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | PUR | 3 | 0,14 | 87,02 | 0,26 | 87,78 |
| 2 | Mineraalivilla | 3 | 0,00 | 83,81 | 0,00 | 84,01 |
| 3 | PUR | 3 | 0,00 | 80,04 | 0,00 | 83,13 |
| 4 | Mineraalivilla | 3 | 0,00 | 69,79 | 0,00 | 74,33 |

6.15 50-luvun paikalla valetun kellarillisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 6)

50-luvun paikalla valetun kellarillisen kerrostalon liittymätarkasteluissa käytettiin ensimmäisen kerroksen seinärakenteena luvussa 6.7 käsiteltyä ulkoseinärakennetta US8 Kellarin seinien rakenteet US9 ja US9.1 on esitetty luvussa 6.8. Laskentamallissa tarkastelut tehtiin kellarin seinästä betonirakenteen ulkopinnasta (tarkastelupiste 1), Ekospray eristeen ulkopinnasta (tarkastelupiste 2), kipsilevyn ulkopinnasta välipohjan alapuolelta (tarkastelupiste 3) sekä välipohjarakenteesta vanhan eristeen ulkopinnasta (tarkastelupiste 4). Tarkastelupisteet on esitetty kuvassa 6.15.1. Vanha ja uusi rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4. Alkuperäinen rakenne on Rakennustieto Oy:n julkaisusta *Kerrostalot 1880 – 2000* [9].



Kuva 6.15.1. 50-luvun paikalla valetun kellarillisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

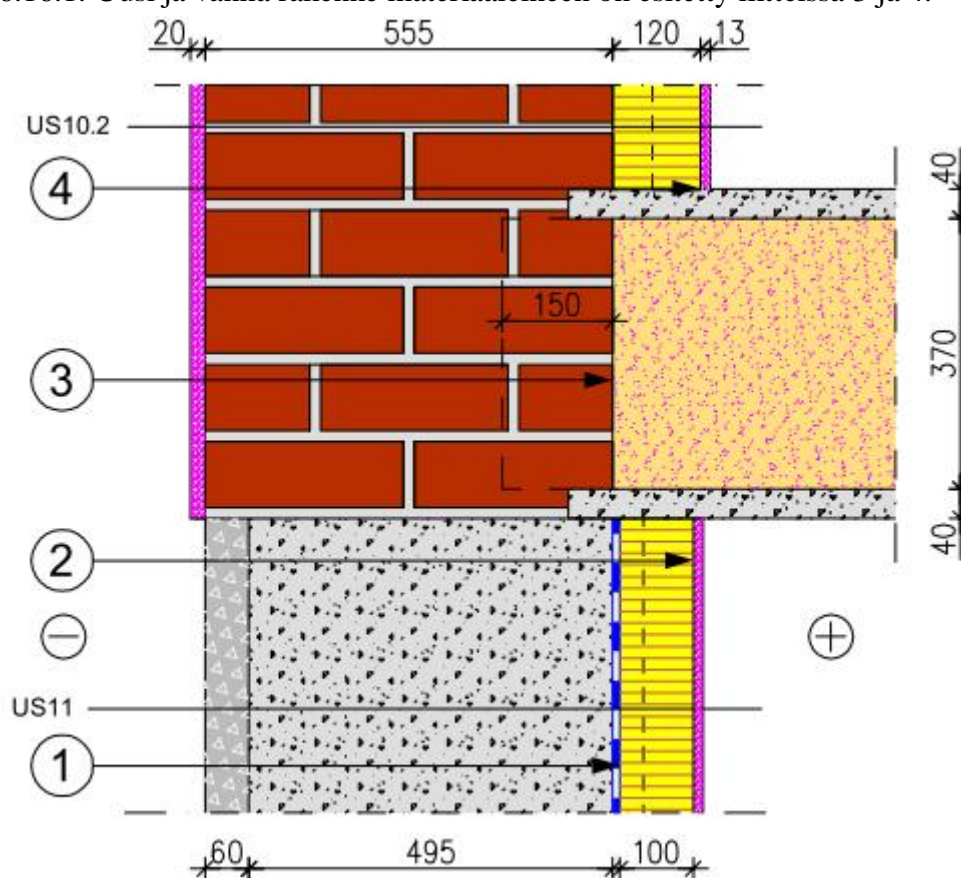
Kaikissa tarkastelupisteissä suhteellinen kosteus pysyy alle kriittisen suhteellisen kosteuden, eikä kosteuden tiivistymistä tai homeen kasvua esiinny. Taulukossa 6.15.1 on esitetty tarkastelupisteiden homeindeksit ja suhteellisen kosteuden maksimiarvot sekä tarkastelupisteiden materiaalien homehtumisherkkyysluokat.

Taulukko 6.15.1. Homeindeksin ja suhteellisen kosteuden maksimi arvot sekä materiaalien homehtumisherkkyysluokat tarkastelupisteittäin kuvan 6.15.1 liitoksissa

| Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------|---------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | PUR | 3 | 0,00 | 73,10 | 0,00 | 71,45 |
| 2 | PUR | 3 | 0,00 | 75,73 | 0,00 | 74,56 |
| 3 | Kipsilevy | 2 | 0,00 | 73,07 | 0,00 | 74,83 |
| 4 | Mineraali- villa | 3 | 0,00 | 70,64 | 0,00 | 74,40 |

6.16 30-luvun kellarillisen massiivitiilirunkoisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitos (Rakenne 7)

30-luvulla rakennetun kellarillisen massiivitiilirunkoisen kerrostalon liittymätarkaste-
luissa käytettiin ensimmäisen kerroksen seinärakenteena luvussa 6.9 käsitellyä ulkosei-
närakennetta US10.2. Laskentamallissa kellarin seinärakenteeseen lisättiin sisäpuolelle
100 mm paksu kerros Ekospray-eristettä, 66 mm leveä teräsrankarunko ja kipsilevy.
Rakenne toteutettiin sijoittamalla teräsrankaväliseinä irti betonirakenteesta. Ratkaisulla
vältettiin kylmäsiltojen muodostuminen rakenteeseen. Tarkastelut tehtiin kellarin sei-
nästä Ekospray-eristeen ulkopinnasta (tarkastelupiste 1), kipsilevyn ulkopinnasta (tar-
kastelupiste 2), vanhan välipohjaeristeen ulkopinnasta (tarkastelupiste 3) sekä välipoh-
jan yläpuolelta kipsilevyn pinnasta (tarkastelupiste 4). Tarkastelupisteet on esitetty ku-
vassa 6.16.1. Uusi ja vanha rakenne materiaaleineen on esitetty liitteissä 3 ja 4.



Kuva 6.16.1. 30-luvun kellarillisen massiivitiilirunkoisen kerrostalon ulkoseinien ja välipohjan liitoskohdan pystyleikkaus ja tarkastelupisteet.

Taulukko 6.16.1. Homeindeksit, suhteellisen kosteuden maksimi arvot ja materiaalien homehtumisherkeyytsluokat tarkastelupisteittään.

| Tarkastelu- piste | Materiaali | HHL | Jokioinen 2004 | | Vantaa 2007 | |
|----------------------|--------------------|-----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | | | Homeindeksi (-) | RH (%) | Homeindeksi (-) | RH (%) |
| 1 | PUR | 3 | 0.00 | 84.56 | 0.00 | 84.77 |
| 2 | Kipsilevy | 2 | 0.00 | 75.61 | 0.00 | 75.21 |
| 3 | Kutterin- lastu | 1 | 5.44 | 97.15 | 0.71 | 91.73 |
| 4 | Kipsilevy | 2 | 0.00 | 74.72 | 0.00 | 72.52 |

Tarkastelupisteissä 1, 2 ja 4 suhteellinen kosteus pysyy alle kriittisen suhteellisen kosteuden, eikä kosteuden tiivistymistä tai homeen kasvua esiinny. Tarkastelupisteen 1 RH on korkea ja tilanne saattaisi olla parempi, jos vanha vedeneriste poistettaisiin. Tämän varmistaminen vaatii kuitenkin lisätutkimuksia. Tarkastelupisteessä 3 RH on korkea molempien testivuosisien ilmastoissa ja Jokioisten 2004 ilmastossa esiintyy myös kosteuden tiivistymistä. Jokioisten 2004 ilmastossa myös homeindeksi nousee selvästi yli sallitun raja-arvon.

7 YHTEENVETO

Laskelmien mukaan betonirakenteissa ulkopuolelle asennettu Ekospray-eriste toimi hyvin sekä ulkoseinärakenteissa, että ryömintätilaisissa alapohjarakenteissa. Näissä rakenteissa ei laskelmien mukaan esiintynyt kosteuden kondensoitumista tai homeen kasvua lämmöneristeen sisä- tai ulkopinnassa. Betoniseinärakenteissa, joissa Ekospray-eristettä käytetään sisäpuolella, saattaa kosteus- ja lämpötilaolosuhteet muodostua homeen kasvulle otollisiksi. Olosuhteisiin vaikuttaa merkittävästi ulkopuolinen kosteuden eristys, sekä sisäpinnan lämmöneristeen paksuus. Liian suuri eristepaksuus laskee betonirakenteen lämpötilaa, mikä nostaa suhteellisen kosteuden arvoa betonin huokostilassa.

Puurankaseinissä riskittömin ja parhaiten toimiva korjausratkaisu saavutettiin tuulettussa puuverhotussa ulkoseinässä, jossa Ekosprayttä käytettiin sekä puurankojen välissä, että puurankojen ulkopuolella. Puurankaseinissä toimivia ratkaisuja löytyi myös muita, mutta niissä olosuhteet olivat ajoittain homeen kasvulle otollisia. Erityisesti tiiliverhoituissa puurankarakenteisissa seinissä esiintyi homeen kasvua ratkaisuissa, joissa ei ollut riittävää lämmöneristekerrosta rankarakenteen ulkopuolella. Homeen kasvun kannalta kriittisimmiksi paikoiksi puurankaseinissä muodostuivat alaohjauspuun ja perusmuurin liittymäkohdat. Erityisesti 70-luvulla rakennetun pientalon sekä kellarillisen rintamamiestalon perusmuurin ja alaohjauspuiden liitoskohtiin muodostui homeen kasvun kannalta otolliset olosuhteet, eikä niiden osalta tässä tutkimuksessa löydetty toimivia ratkaisuja.

Puurakenteiset ryömintätilaiset alapohjarakenteet, joissa Ekospray asennettiin rakenteen alapintaan sekä vanhan seinärakenteen pintaan, ei esiintynyt kosteuden kondensoitumista, eikä homeen kasvua. Näissä rakenteissa rakenteen sisäosiin muodostuviin kosteusolosuhteisiin vaikuttaa suuresti Ekospray-eristeen sisäpuolelle jäävän eristekerroksen materiaalin hygroskooppisuus ja lämmön-johtavuus.

Hirsiseinissä voidaan tämän tutkimuksen perusteella käyttää Ekospray-eristettä hirsirakenteen sisäpuolella. Tutkimuksen mukaan uudet energiamääräykset täyttävä eristepaksuus muodostaa kuitenkin korkeamman suhteellisen kosteuden hirren sisäpintaan verrattuna ohuempaan eristepaksuuteen. Jo 60 mm:n kerroksella Ekosprayttä saavutettiin riittävä vesihöyryn-vastus rakenteen sisäpuolelle, eikä hirsirakenteen lämpötilan laskun seurauksena noussut suhteellisen kosteuden arvo ollut vielä homeen kasvun kannalta kriittisellä tasolla.

Massiivitiiliseinärakenteissa sisäpuolella käytettävä Ekospray toimii, kun seinärakenne on suojattu ulkopuolista kosteutta vastaan. Niissä tapauksissa, joissa ulkopuolinen kosteus pääsee tunkeutumaan seinärakenteeseen, muodostuu homeen kasvulle otolliset olosuhteet ja suhteellinen kosteus nousee lähes 100 %:iin.

Kaikki tämän tutkimuksen laskennat on suoritettu olettaen rakenteiden toteutusten olevan moitteettomasti tehty. Käytettäessä Ekospray-eristettä korjausrakentamisessa on jokainen tapaus tutkittava ja mietittävä erikseen. Mahdollisten työvirheiden seurauksista raken-teeseen pääsevän ylimääräisen kosteuden vaikutus voi vaikuttaa oleellisesti rakenteen kosteustekniseen toimintaan ja altistaa rakenteen homeen kasvulle. Ekospray muodostaa vesihöyrytiivin kerroksen, jonka vaikutuksesta rakenteen kuivuminen eristeen sijainti-puolelle on hidasta. Rakenteen lähtökosteus on myös merkittävä tekijä niissä rakenneratkaisuissa, joissa rakenne jää kahden melko vesihöyrytiivin kerroksen väliin. Myös ulkoseinärakenteiden ja ala- sekä välipohjien liittymät vaihtelevat suuresti vanhoissa rakennuksissa ja jokainen rakenneratkaisu on harkittava aina tapauskohtaisesti.

Tässä tutkimuksessa lähtökohtana oli uusien energiamääräysten toteutuminen rakennusosakohtaisesti ottamalla huomioon rakenteen U-arvo. Jatkotutkimuksena Ekospray-eristeestä kannattaisi tehdä tutkimus, jossa vertailtaisiin eri eristepaksuuksien vaikutusta rakenteisiin ja jonka avulla pyritäisiin optimoimaan eristepaksuus kosteusteknisen toiminnan kannalta parhaaksi mahdolliseksi. Lisäksi jatkotutkimuksissa kannattaisi tutkia ennustetun ilmastonmuutoksen sekä mahdollisten kosteusvuotojen vaikutuksia tehtyihin korjausratkaisuihin. Alla olevaan taulukkoon 7.1 on koottu lyhyt yhteenveto tarkastelluista rakenteista.

Taulukko 7.1. Yhteenveto tutkittujen rakenneratkaisujen toimivuudesta.

| Toimiva ratkaisu | Ei toimiva ratkaisu |
|------------------|---------------------|
| | US1 |
| | US2 |
| US3 | |
| US4 | |
| | US5 |
| | US6 |
| US7 | |
| US8 | |
| US9 | |
| US9.1 | |
| | US10 |
| | US10.1 |
| US10.2 | |
| | RAKENNE1 |
| RAKENNE2 | |
| RAKENNE3 | |
| | RAKENNE4 |
| RAKENNE5 | |
| RAKENNE6 | |
| | RAKENNE7 |

LÄHTEET

- [1] Björkholz, D., 1987. Lämpö ja kosteus – rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki, 159 s.
- [2] Hagentoft, C.-E., 2001. Introduction to Building Physics. Studentlitteratur, Lund, 422 s.
- [3] Hens, H., 2007. Building Physics-Heat, Air and Moisture, Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises, Berliini, Ernst and Sohn, 270 s.
- [4] Hukka, A. & Viitanen, H. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology. Vol. 33, pp. 475-485.
- [5] Jylhä, K., Kalamees, T., Tietäväinen, H., Ruostenoja, K., Jokisalo, J., Hyvönen, R., Ilomets, S., Saku, S., Hutila, A., 2011. Rakennusten energianlaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista, Ilmatieteen laitos, raportteja 2011:6, Helsinki, Ilmatieteen laitos, 110 s.
- [6] Moilanen, T., 2011. 70-luvun pientalon korjausopas, Aducate Reports and Books 13/2011, Koulutus- ja kehittämispalvelu Aducate, Itä-Suomen yliopisto, Kuopio [verkkojulkaisu]. 76 s. Saatavissa: http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-0338-9/urn_isbn_978-952-61-0338-9.pdf
- [7] Mäkitalo Mikael 2012. Puurunkoisten ulkoseinien kosteustekninen toimivuus nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka.
- [8] Mäkiö, E., Malinen, M., Neuvonen, P., Vikström, K., Mäenpää, R., Saarenpää, J., Tähti, E., 1994, Kerrostalot 1960-1975, Rakennustieto Oy, 288 s.
- [9] Neuvonen, P., 2006, Kerrostalot 1880-2000, Rakennustieto Oy, Helsinki, 288 s.
- [10] RakMk D. LVI- ja energiatalous. 4/2013 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä.
- [11] Rinne, H., 2013. Perinnemestarin rintamamiestalo, kunnostus ja ylläpito. Riika. WSOY. 256 s.
- [12] Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. RIL 107-2012 Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet.
- [13] Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Lausunto nro TRT/2074/2012.
- [14] Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A., Palolahti, T. 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159.
- [15] Vinha, J., Rakennusfysiikka, Luentomoniste 2011. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos.
- [16] Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A., Käkelä, P., 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysiikkaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tutkimusraportti 129. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. 101 s. + liitt. 211 s.
- [17] Vinha, J., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Salminen, K., Paajanen, L., Strander, T., Iitti, H., Rakennusmateriaalien ja rakenteiden homehtumisriskin laskennallinen arviointi. Tutkimusraportti 143. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 151 s. + liitt. 2 s.

- [18] Vinha, Juha. Professori. Tampereen teknillinen yliopisto. Keskustelu 9.4.2014.
- [19] Wufi Pro 5.1 Online help. PC Software Tool for One-dimensional Hygrothermal Building Envelope Simulation. Fraunhofer IBP.

LIITTEET

LIITE 1

Materiaaliominaisuudet 6 s.

LIITE 2

Uudet ja vanhat ulkoseinärakenteet 11 s.

LIITE 3

Vanhat rakenneliitokset 7 s.

LIITE 4

Uudet rakenneliitokset 7 s.

Perusarvot

| Nro | Materiaali | Tiheys [kg/m ³] | Huokoisuus [m ³ /m ³] | Ominaislämpö- kapasiteetti [J/(kgK)] | Lämmön- johtavuus [W/(mK)] | Vesihöyryn diffuusio- vastuskerroin [-] |
|-----|-------------------------------|--------------------------------|---|--|----------------------------------|--|
| 1 | Betoni | 2220 | 0,18 | 850 | 1,6 | 248 |
| 2 | Ruiskutettava PU-eriste | 40 | 0,95 | 1500 | 0.025-0.027 ⁽¹⁾ | 91,5 |
| 3 | EPS | 15 | 0,40 | 1300 | 0,039 | 30 |
| 4 | Havuvaneri 9 mm | 394 | 0,65 | 1500 | 0,11 | 232 ⁽²⁾ |
| 5 | Hiekkainen sora | 1925 | 0,5 | 1000 | 2 | 5 |
| 6 | Huokoinen puukuitulevy 12 mm | 270 | 0,85 | 1500 | 0,048 | 5,5 |
| 7 | Höyrynsulkumuovi 1 mm | 980 | 0,001 | 2300 | 0,4 | 89000 |
| 8 | Ilmarako | 1,3 | 1,00 | 1000 | 0,18 | 0,46 |
| 9 | Kevytbetoniharkko | 500 | 0,77 | 850 | 0,12 | 8 |
| 10 | Kipsilevy 13 mm | 574 | 0,77 | 1100 | 0,19 | 6,9 |
| 11 | Kivivilla | 37 | 0,97 | 850 | 0,034 | 1,2 |
| 12 | Kuituvahvisteinen KS-laasti | 1800 | 0,24 | 850 | 1,0 | 15 |
| 13 | Kutterin lastu | 130 | 0,9 | 2500 | 0,08 | 2,5 |
| 14 | Mänty | 532 | 0,90 | 2700 | 0,1 | 84 |
| 15 | Puukuitueriste | 37 | 0,97 | 2000 | 0,038 | 1,3 |
| 16 | Sahanpuru | 168 | 0,87 | 2500 | 0,08 | 2,1 |
| 17 | Sementtipohjainen rappauslevy | 1150 | 0,67 | 850 | 0,36 | 66 |
| 18 | Silikonihartsimaali | 2000 | 0,44 | 1000 | 0,7 | 46 |
| 19 | Silikonihartsipinnoite | 2000 | 0,44 | 1000 | 0,7 | 90 |
| 20 | Tiili | 1430 | 0,30 | 900 | 0,45 | 12 |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | 1780 | 0,30 | 850 | 0,40 | 79 |

¹⁾ lämmönjohtavuus on eristekerroksen paksuudesta riippuva

²⁾ vesihöyryn diffuusiovastuskerroin on suhteellisesta kosteudesta riippuva

Tasapainokosteuskäyrät 2/2

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------------|---------------------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | Tiili | RH [%] | 0,0 | 11,3 | 32,8 | 57,6 | 75,2 | 84,3 | 90,0 | 96,0 | 99,3 | 99,8 | 99,9 | 100,0 |
| | | w [kg/m ³] | 0,0 | 1,4 | 2,0 | 5,9 | 10,3 | 15,9 | 18,6 | 26,4 | 103,0 | 172,0 | 209,0 | 262,0 |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | RH [%] | 0,0 | 33,0 | 55,0 | 65,0 | 75,0 | 80,0 | 83,0 | 86,0 | 93,0 | 97,0 | 1,0 | |
| | | w [kg/m ³] | 0,0 | 27,3 | 44,3 | 56,1 | 67,8 | 126,0 | 161,0 | 180,0 | 222,0 | 271,0 | 280,0 | |

¹⁾ Ruiskutettavan PU-eristeen arvoina on tässä käytetty XPS-eristeen arvoja

Tasapainokosteuskäyrät 2/2

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------------------|---------------------------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 20 | Tiili | RH [%] | 0,0 | 11,3 | 32,8 | 57,6 | 75,2 | 84,3 | 90,0 | 96,0 | 99,3 | 99,8 | 99,9 | 100,0 |
| | | w [kg/m ³] | 0,0 | 1,4 | 2,0 | 5,9 | 10,3 | 15,9 | 18,6 | 26,4 | 103,0 | 172,0 | 209,0 | 262,0 |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | RH [%] | 0,0 | 33,0 | 55,0 | 65,0 | 75,0 | 80,0 | 83,0 | 86,0 | 93,0 | 97,0 | 1,0 | |
| | | w [kg/m ³] | 0,0 | 27,3 | 44,3 | 56,1 | 67,8 | 126,0 | 161,0 | 180,0 | 222,0 | 271,0 | 280,0 | |

¹⁾ Ruiskutettavan PU-eristeen arvoina on tässä käytetty XPS-eristeen arvoja

Kosteusdiffusiviteetti (DWS) ja kosteuden uudelleenjakaantuminen (DWW) 2/2

| Nro. | Materiaali | w [kg/m ³] | DWS [m/s ²] | DWW [m/s ²] |
|------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 17 | Sementtipohjainen rappauslevy | 0 | 0 | 0 |
| | | 17 | 4,00E-11 | 4,00E-11 |
| | | 97 | 6,40E-09 | 1,70E-07 |
| 18 | Silikonihartsimaali | 0 | 0 | 0 |
| | | 32 | 5,50E-13 | 5,50E-13 |
| | | 300 | 2,60E-10 | 2,60E-11 |
| 19 | Silikonihartsipinnoite | 0 | 0 | 0 |
| | | 2,9 | 5,00E-13 | 5,00E-13 |
| | | 300 | 4,70E-10 | 4,70E-11 |
| 20 | Tiili | 0 | 0 | 0 |
| | | 13 | 3,10E-09 | 2,00E-10 |
| | | 262 | 3,00E-07 | 3,00E-07 |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | 0 | 0 | 0 |
| | | 271 | 2,62E-08 | 2,62E-08 |
| | | 280 | 3,28E-08 | 3,28E-09 |

Kosteusdiffusiviteetti (DWS) ja kosteuden uudelleenjakaantuminen (DWW) 2/2

| Nro. | Materiaali | w [kg/m ³] | DWS [m/s ²] | DWW [m/s ²] |
|------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 17 | Sementtipohjainen rappauslevy | 0 | 0 | 0 |
| | | 17 | 4,00E-11 | 4,00E-11 |
| | | 97 | 6,40E-09 | 1,70E-07 |
| 18 | Silikonihartsimaali | 0 | 0 | 0 |
| | | 32 | 5,50E-13 | 5,50E-13 |
| | | 300 | 2,60E-10 | 2,60E-11 |
| 19 | Silikonihartsipinnoite | 0 | 0 | 0 |
| | | 2,9 | 5,00E-13 | 5,00E-13 |
| | | 300 | 4,70E-10 | 4,70E-11 |
| 20 | Tiili | 0 | 0 | 0 |
| | | 13 | 3,10E-09 | 2,00E-10 |
| | | 262 | 3,00E-07 | 3,00E-07 |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | 0 | 0 | 0 |
| | | 271 | 2,62E-08 | 2,62E-08 |
| | | 280 | 3,28E-08 | 3,28E-09 |

Lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden funktiona

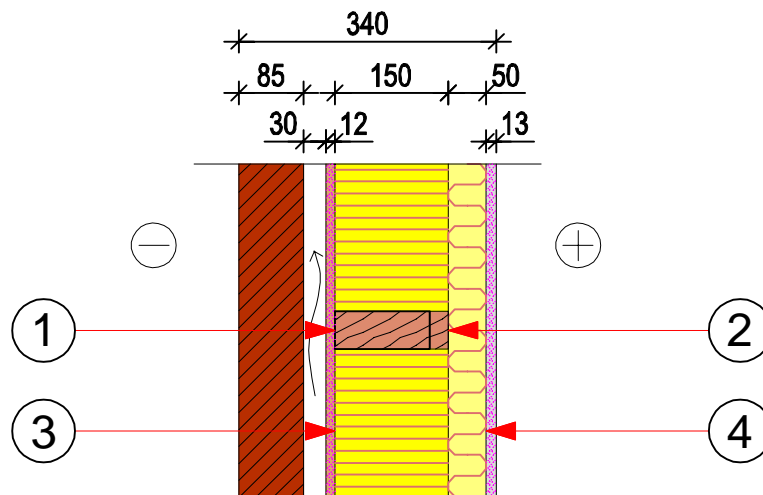
| Nro. | Materiaali | λ [W/(mK)], f w [kg/m ³] | | | | | | | |
|------|------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| 1 | Betoni | w [kg/m ³] | 0 | 180,0 | | | | | |
| | | λ [W/(mK)] | 1,6 | 2,638 | | | | | |
| 4 | Havuvaneri 9 mm | w [kg/m ³] | 0 | 22,9 | 43,2 | 86,4 | 126,0 | 650 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,6 | |
| 5 | Hiekkainen sora | w [kg/m ³] | 0 | 9,6 | 19,3 | 28,9 | 48,1 | 77 | 193 |
| | | λ [W/(mK)] | 0,55 | 0,8 | 1 | 1,2 | 1,50 | 1,9 | 2,7 |
| 6 | Huokoinen puukuitulevy 12 mm | w [kg/m ³] | 0 | 12,4 | 22,4 | 45,9 | 71,3 | 850 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,047 | 0,049 | 0,051 | 0,054 | 0,05 | 0,6 | |
| 9 | Kevytbetoniharkko | w [kg/m ³] | 0 | 770,0 | | | | | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,12 | 0,804 | | | | | |
| 10 | Kipsilevy 13 mm | w [kg/m ³] | 0 | 4,6 | 6,7 | 10,1 | 17,7 | 770 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,2 | 0,21 | 0,6 | |
| 11 | Kivivilla | w [kg/m ³] | 0 | 0,15 | 0,33 | 0,62 | 0,93 | 970 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,035 | 0,6 | |
| 13 | Kutterinlastu | w [kg/m ³] | 0 | 7,8 | 14,5 | 25,5 | 36,3 | | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,053 | 0,053 | 0,055 | 0,057 | 0,06 | | |
| 14 | Mänty | w [kg/m ³] | 0 | 32 | 62 | 126 | 185 | 900 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,1 | 0,11 | 0,12 | 0,1 | 0,15 | 0,6 | |
| 15 | Puukuitueriste | w [kg/m ³] | 0 | 1,90 | 4,00 | 8,60 | 15,20 | 970 | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,038 | 0,038 | 0,038 | 0,039 | 0,040 | 0,6 | |
| 16 | Sahanpuru | w [kg/m ³] | 0 | 10,7 | 16,2 | 34,4 | 47,5 | | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,054 | 0,056 | 0,058 | 0,062 | 0,07 | | |
| 20 | Tiili | w [kg/m ³] | 0 | 300,0 | | | | | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,45 | 1,205 | | | | | |
| 21 | Tuulensuojaluja 6 mm | w [kg/m ³] | 0 | 280 | | | | | |
| | | λ [W/(mK)] | 0,4 | 0,6 | | | | | |

70-LUVUN PIENTALO

US1: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

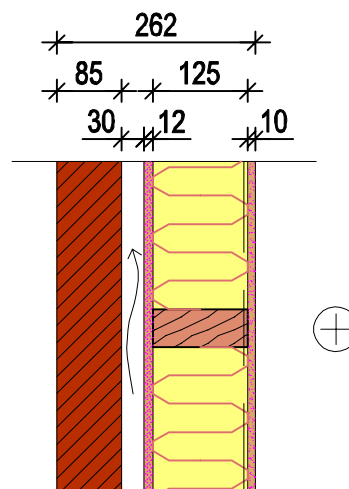
U-arvo ~ 0,16 W/m²K

| | |
|--------|--|
| 85 mm | Vanha tiiliverhous |
| ~30 mm | Tuuletusväli |
| 12 mm | Tuulensuoja, vanha huokoinen puukuitulevy |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 k600 + Ekospray 40E 125 mm |
| 25 mm | Puukoolausta 22x50 mm k600 + Ekospray 40E 22 mm |
| 50 mm | Mineraalivilla + 50x50 mm vaakapuukoolausta k600 |
| 13 mm | Kipsilevy |



US1V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|--|
| 85 mm | Vanha tiiliverhous |
| 30 mm | Tuuletusväli |
| 12 mm | Vanha huokoinen puukuitulevy |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm, k600 + vanha mineraalivillaeriste 125 mm |
| | Vanha höyrynsulkumuovi |
| 10 mm | Vanha lastulevy |

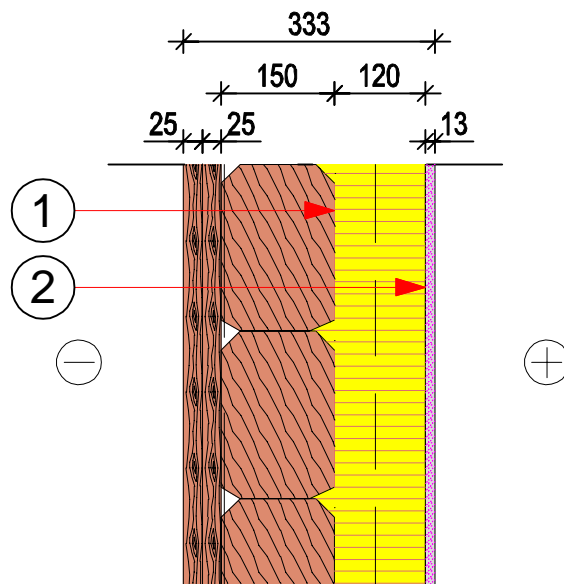


HIRSIRUNKOINEN PIENTALO

US3: LISÄERISTETTY PUUVERHOILTU HIRSISEINÄ:

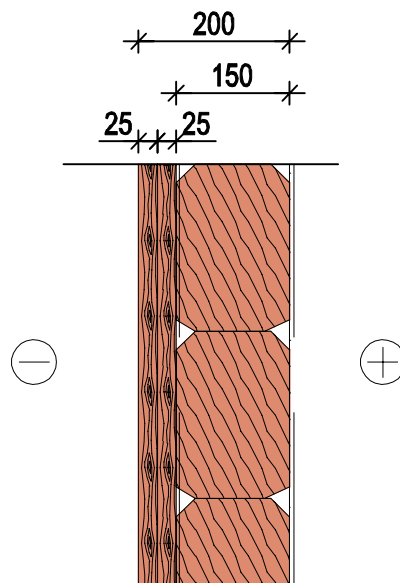
U-arvo ~ 0,16W/m²K

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha pystylomalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 150 mm | Vanha vaakahirsirunko |
| 120 mm | Ekospray 40E 120 mm + teräsrunkaseinä 66 mm k600 (teräsrunka 54 mm irti hirsiseinästä) |
| 13 mm | Kipsilevy |



US3V: VANHA PUUVERHOILTU HIRSISEINÄ:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha pystylomalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 150 mm | Vanha vaakahirsirunko |
| | Vanha pinkopahvi/huokoinen puukuitulevy |
| | Vanha tapetti |

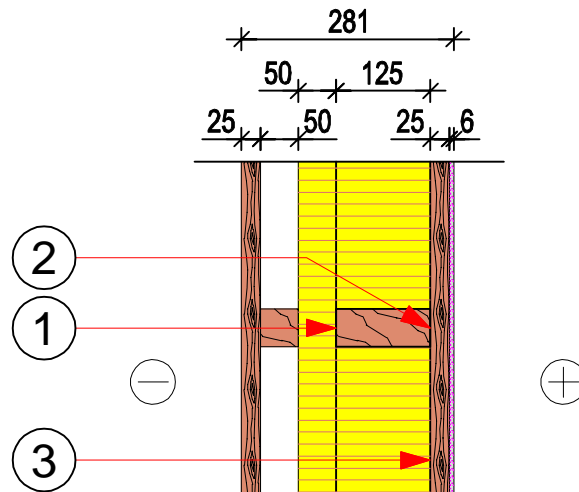


RINTAMAMIESTALO

US4: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ, ERISTEET UUSITTU ULKOPUOLELTA

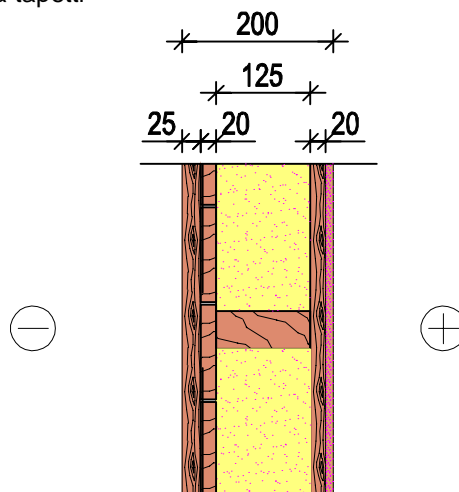
U-arvo 0,17 W/m²K:

| | |
|--------|--|
| 25 mm | Puu-ulkooverhous, vaakapaneeli |
| 50 mm | Pystykoolaus 50 mm + tuuletusväli |
| 50 mm | Ekospray 40E 50mm |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + Ekospray 40E 125 mm |
| 25 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| 6 mm | Saneerausripsilevy |



US4V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|--|
| 25 mm | Vanha puu-ulkooverhous |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + vanha eriste (kutterinlastu, sahanpuru, metsäsammal) |
| 20 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi/pinkopahvi |
| | Vanha tapetti |

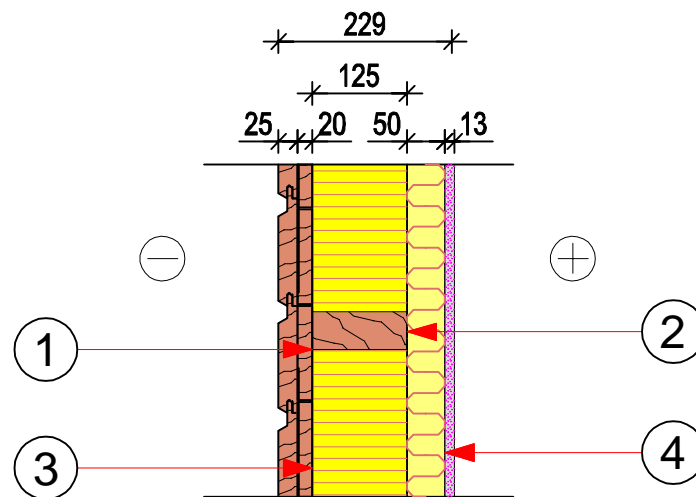


RINTAMAMIESTALO

US5: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ, ERISTEET UUSITTU SISÄPUOLELTA

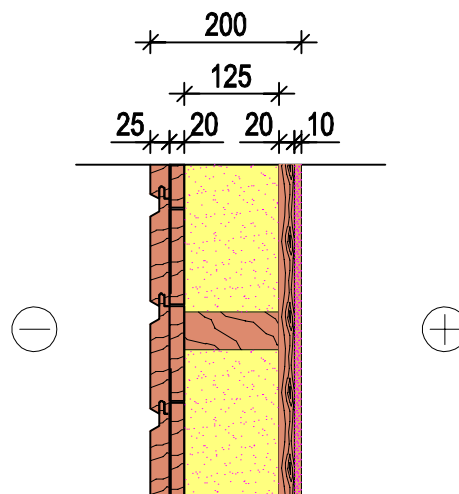
U-arvo 0,15 W/m²K:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous, pystypanelointi |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + ekospray 40E 125 mm |
| 50 mm | Puukoolaus 50x50 mm + mineraalivillaeriste (lambda 0,036) |
| 13 mm | Kipsilevy |



US4V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 30 mm | Vanha eriste (kutterinlastu, sahanpuru) |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm |
| 20 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| | Vanha pintamateriaali |

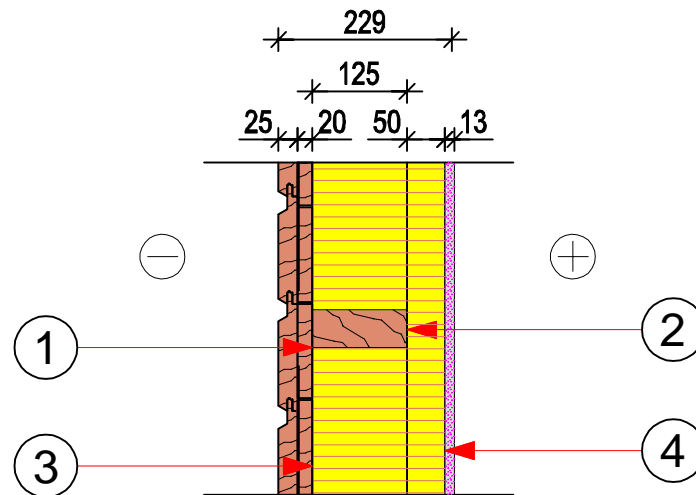


RINTAMAMIESTALO

US5.1: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ, ERISTEET UUSITTU SISÄPUOLELTA

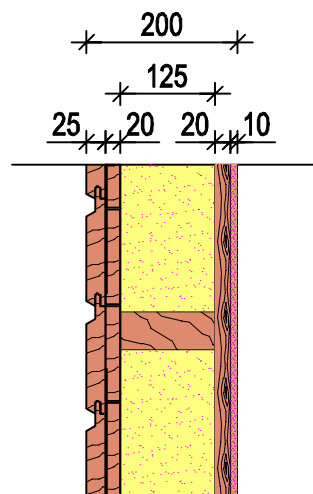
U-arvo 0,15 W/m²K:

| | |
|--------|--|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous, pystypanelointi |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + ekospray 40E 125 mm |
| 50 mm | Puukoolaus 50x50 mm + ekospray 40 E 50 mm |
| 13 mm | Kipsilevy |



US4V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 30 mm | Vanha eriste (kutterinlastu, sahanpuru) |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm |
| 20 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| | Vanha pintamateriaali |

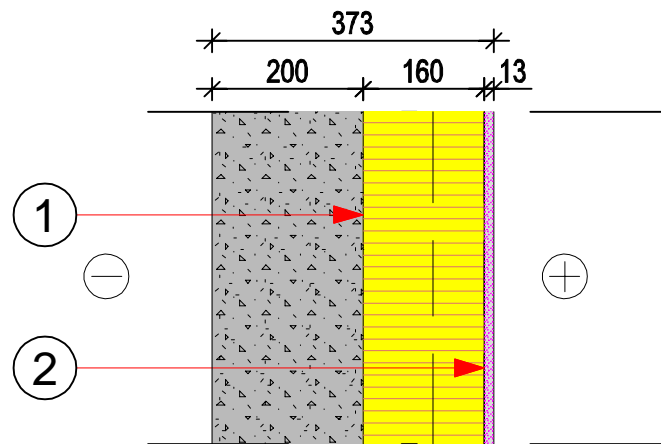


RINTAMAMIESTALO

US6: KELLARISEINÄ, ERISTETTY SISÄPUOLELTA: U-arvo 0,17 W/m²K

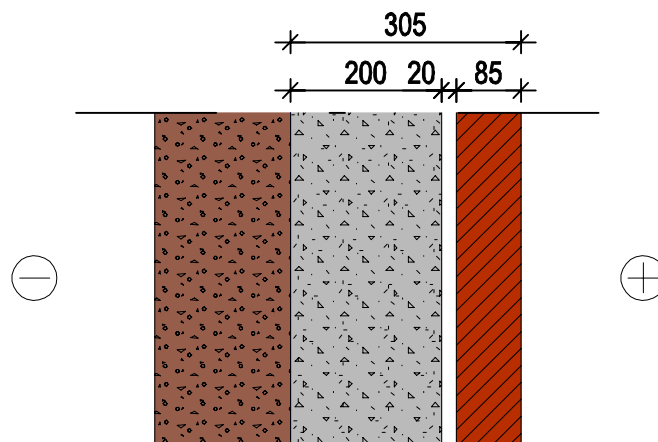
200 mm Vanha säästöbetoniseinä
 150 mm Ekospray 150 mm + teräsrankaseinä 68 mm k600
 13 mm Kipsilevy 13 mm
 (Maan yläpuolinen ulkopuolen osuus ilman soratäyttöä, EPS-levyä ja vesieristettä)

Huom! Wufi 2-D ohjelmalla tarkastelu tehty ulkoilmaa vasten olevasta seinärakenteesta!



US6V: VANHA KELLARISEINÄ:

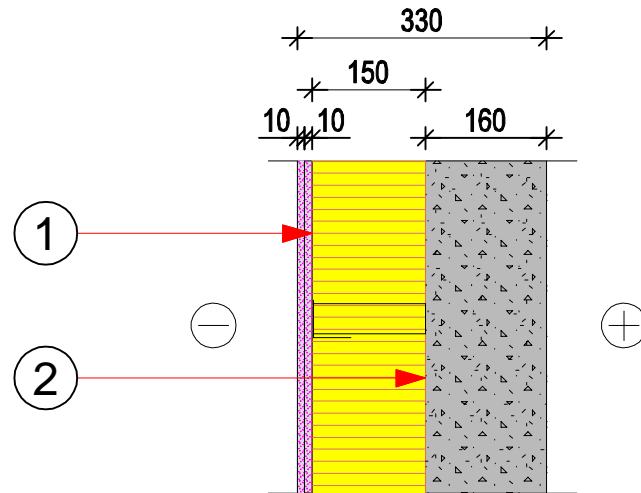
200 mm Soratäyttö
 Vanha säästöbetoniseinä
 Ilmarako
 Vanha kevyttiiliseinä



70-LUVUN BETONIELEMENTTI KERROSTALO

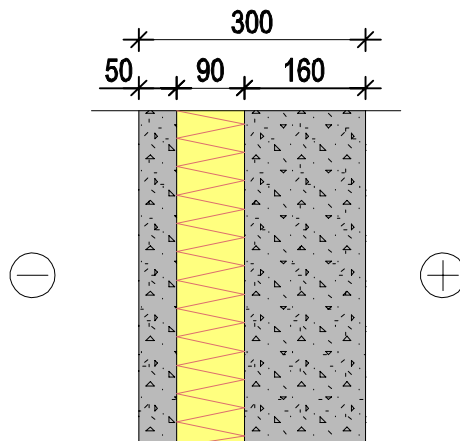
US7: KORJATTU SANDWICH-ELEMENTTI ULKOSEINÄ: U-arvo 0,17 W/m²K

| | |
|--------|--|
| ~10 mm | Ohut rappaus |
| 10 mm | Rappauslevy |
| 150 mm | Ekospray 40E 150 mm + teräskoolaus |
| 160 mm | Vanha sandwich-elementin kantava sisäkuori |



US7V: VANHA SANDWICH-ULKOSEINÄ:

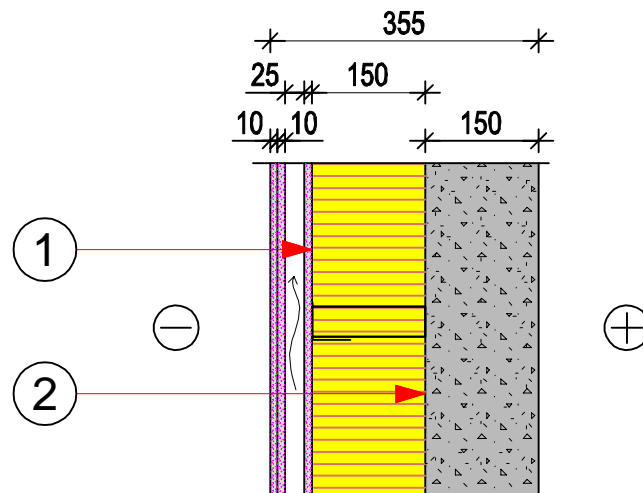
| | |
|--------|----------------------------|
| 80 mm | Vanha betoniulkokuori |
| 90 mm | Vanha mineraalivillaeriste |
| 160 mm | Vanha kantava sisäkuori |



50-LUVUN PAIKALLA VALETTU BETONI KERROSTALO

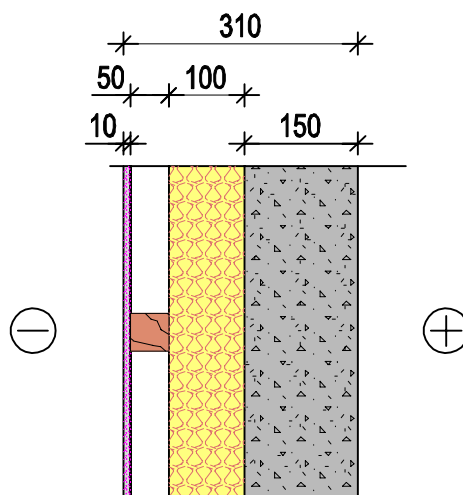
US8: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN ULKOSEINÄ: U-arvo 0,17 W/m²K

| | |
|--------|---|
| ~10 mm | Ohut rappaus |
| 10 mm | Rappauslevy |
| 25 mm | Tuuletusväli + tuuletusreiällinen teräs hattuorsi |
| 6 mm | Tuulensuojaluja 6 mm (vähintään B-s1, d0) |
| 150 mm | Ekospray 40E + teräskoolaus |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä/sandwich sisäkuori |



US8V: VANHA BETONIRAKENTEINEN ULKOSEINÄ:

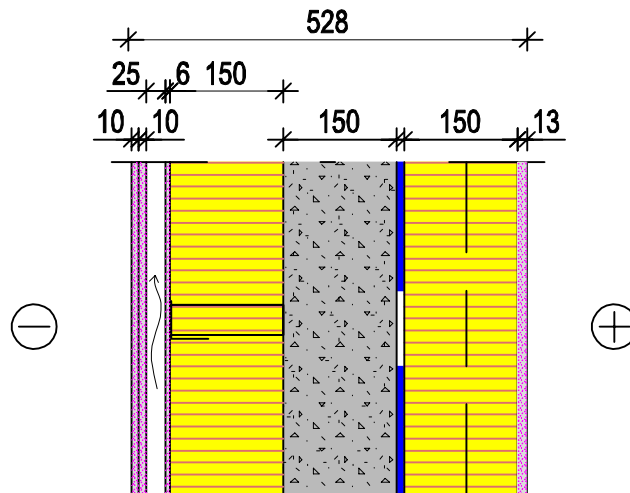
| | |
|--------|---|
| | Vanha ulkoverhouslevy |
| | Alusrimoitus ja ilmarako |
| 100 mm | Vanha puinen pystyrunko 50x100 mm k600 + lastuvillalevy |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |



50-LUVUN PAIKALLA VALETTU BETONI KERROSTALO

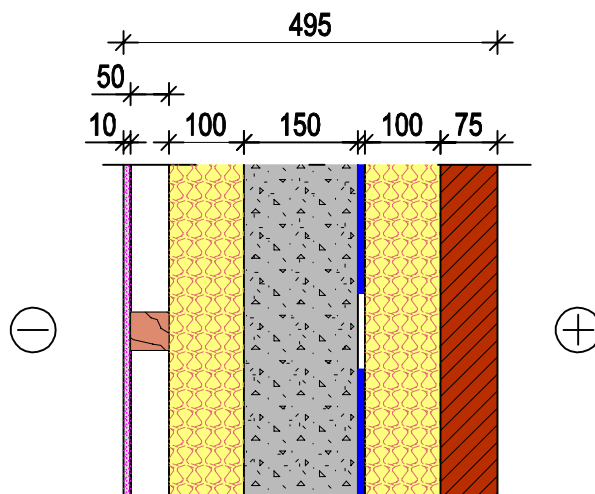
US9: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ: U-arvo 0,08 W/m²K

| | |
|--------|---|
| ~10 mm | Ohut rappaus, Serpovent |
| 10 mm | Rappauslevy Knauf Aquapanel Outdoor |
| 25 mm | Tuuletusväli + tuuletusreiällinen teräs hattuorsi |
| 6 mm | Tuulensuojaluja 6 mm (vähintään B-s1, d0) |
| 150 mm | Ekospray 40E + teräskoolaus |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä/sandwich sisäkuori |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 150 mm | Ekospray 40E+ teräskoolaus k600 |
| 13 mm | Kipsilevy 13 mm |



US9V: VANHA BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ:

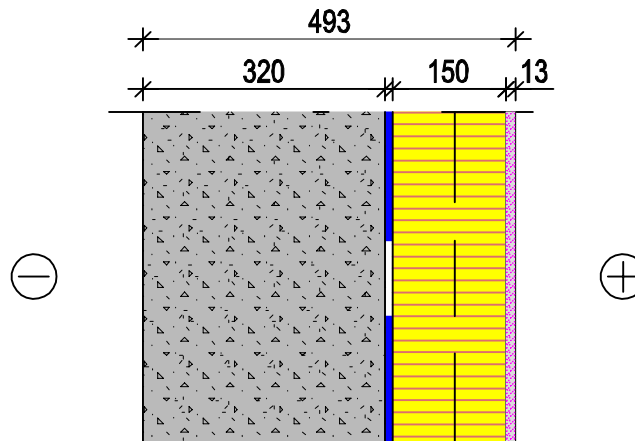
| | |
|--------|---|
| | Vanha ulkoverhouslevy |
| | Vanha alusrimointus + ilmarako |
| 100 mm | Vanha puurakenteinen pystyrunko 50x100 mm k600 + lastuvillalevy |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 100 mm | Vanha lastuvillalevy |
| 75 mm | Vanha sahajauhottiili |



50-LUVUN PAIKALLA VALETTU BETONI KERROSTALO

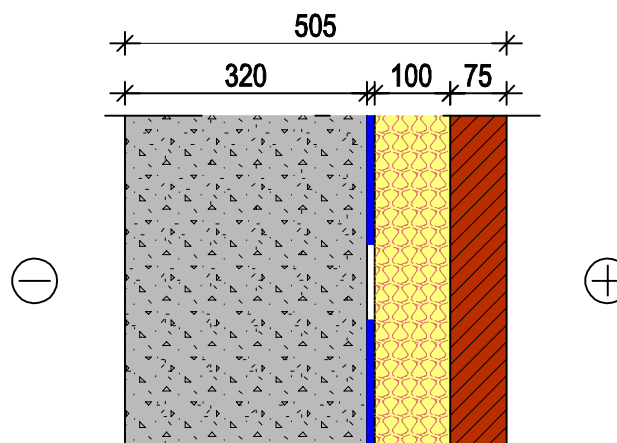
US9.1: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ: U-arvo 0,16 W/m²K

| | |
|--------|------------------------------------|
| 320 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 150 mm | Ekospray 40E + teräskoolaus k600 |
| 13 mm | Kipsilevy 13 mm |



US9.1V: VANHA BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ:

| | |
|--------|------------------------------------|
| 320 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 100 mm | Vanha lastuvillalevy |
| 75 mm | Vanha sahajauhottiili |



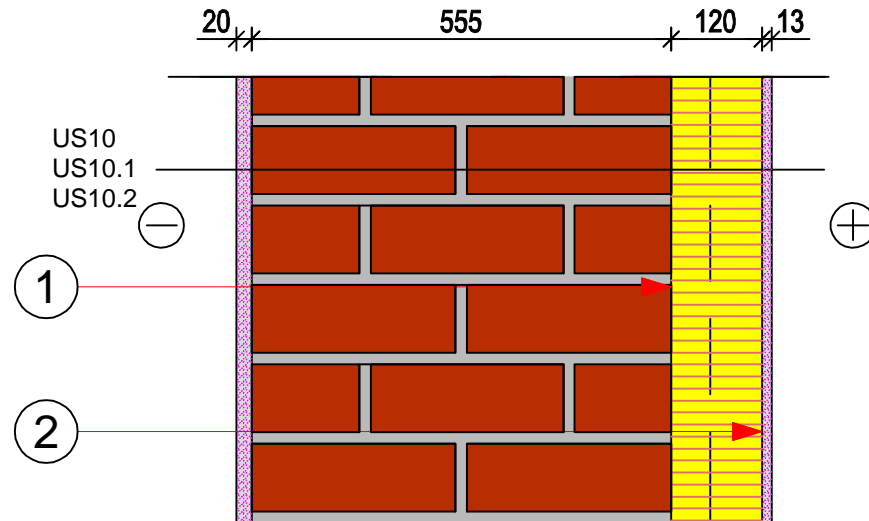
30-LUVUN RAPATTU MASSIVITIILISEINÄRUNKONEN KERROSTALO

US10: SISÄLTÄPÄIN ERISTETTY MASSIVITIILISEINÄ: U-arvo 0,17 W/m²K

US10.1: SISÄLTÄPÄIN ERISTETTY MASSIVITIILISEINÄ, KOLMIKERROSRAPPAUS

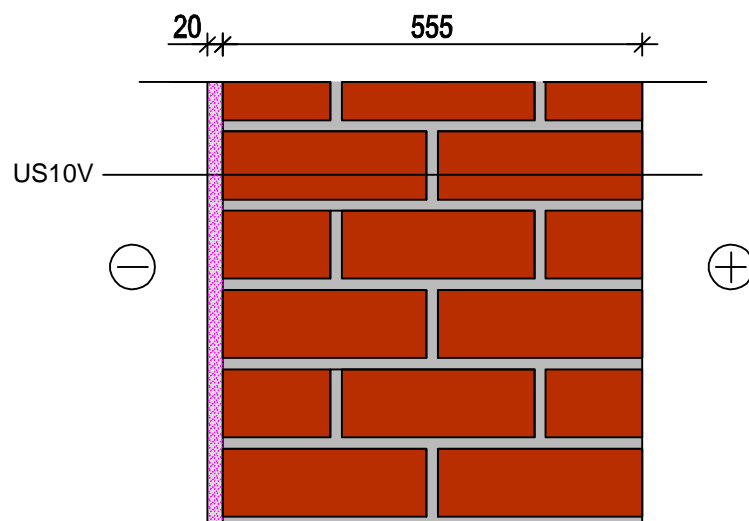
US10.2: SISÄLTÄPÄIN ERISTETTY MASSIVITIILISEINÄ, KOLMIKERROSRAPPAUS,
ULKOPINNOITE VETTÄ HYLKIVÄ

| | |
|--------|--|
| 20 mm | Kolmikerrosrappaus |
| 555 mm | Vanha massiivinen umpitiiliseinä |
| 120 mm | Ekospray 40E 120 mm + teräsrunkaseinä 68 mm k600 (52 mm irti tiiliseinästä) |
| 13 mm | Kipsilevy 13 mm |

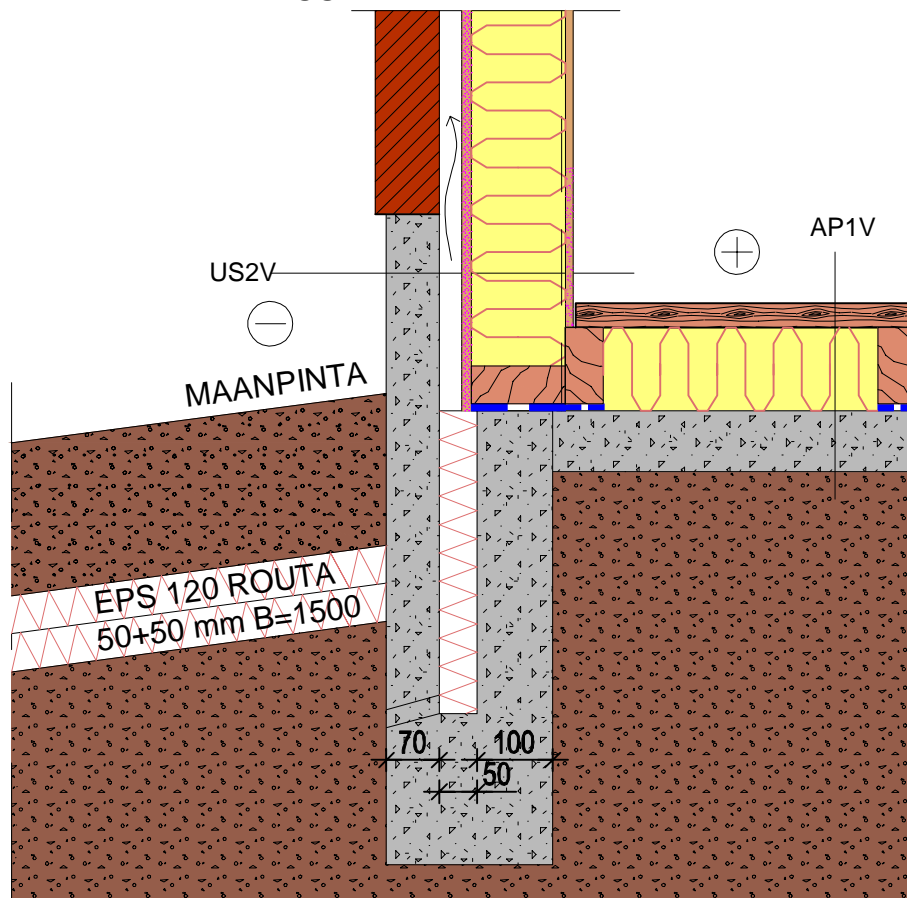


US10V: VANHA (RAPATTU) MASSIVITIILISEINÄ:

| | |
|--------|----------------------------------|
| 20 mm | Kolmikerrosrappaus |
| 555 mm | Vanha massiivinen umpitiiliseinä |



VANHA RAKENNE 1, 70-LUVUN PIENTALO
RAKENNELEIKKAUS



RAKENNETYYYPIT:

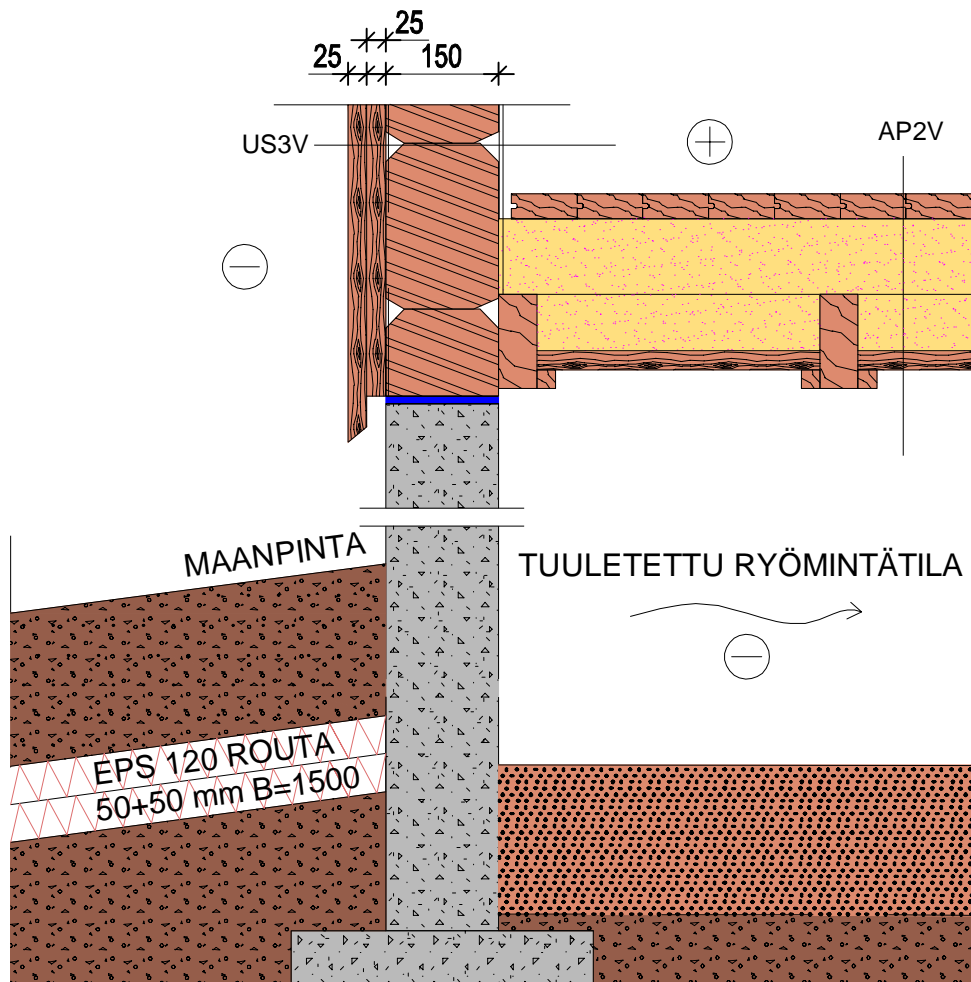
US2V: KORJATTU PUURAKENTEINEN ULKOSEINÄ ALAOSA: U-arvo 0,17W/m²K

| | |
|--------|--|
| 70 mm | Vanha betoni 70 mm |
| 30 mm | Tuuletusväli |
| 12 mm | Vanha huokoinen puukuitulevy |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm, k600 + vanha mineraalivillaeriste 125 mm |
| | Vanha höyrinsulkumuovi |
| 10 mm | Vanha lastulevy |

AP1V: KORJATTU MAANVASTAINEN BETONI ALAPOHJA:

| | |
|--------|--|
| | Vanha laualattia |
| 100 mm | Vanha puukoolaus 50x100 mm k400-600 + vanha mineraalivillaeriste 100 mm |
| 80 mm | Vanha betonilaatta |

VANHA RAKENNE 2, HIRSIRUNKOINEN PIENTALO
RAKENNELEIKKAUS:



RAKENNETYYYPIT:

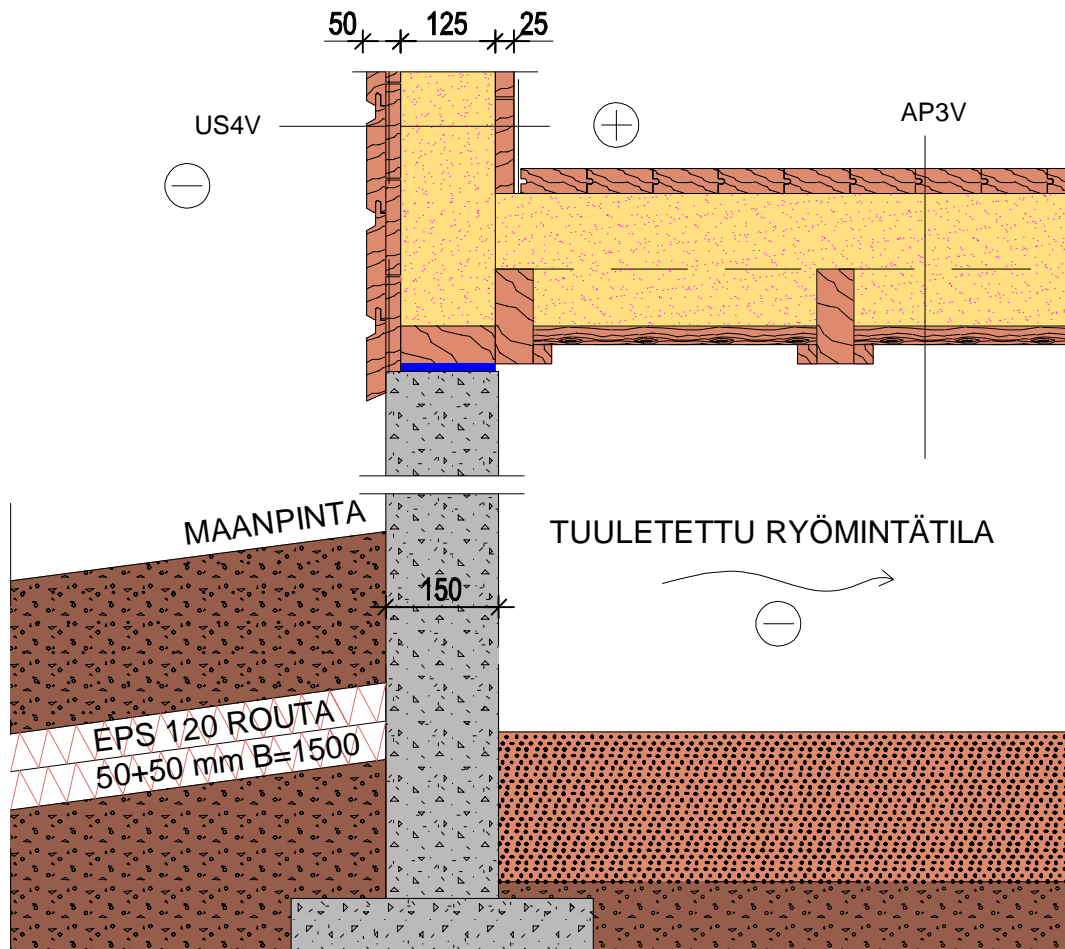
US3V: VANHA VAAKAHIRSISEINÄ

| | |
|--------|--------------------------|
| 25 mm | Vanha pystylomalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 150 mm | Vanha vaakahirsirunko |

AP2V: VANHA PUURAKENTEINEN RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA

| | |
|------------|---|
| | Vanha lankkulattia |
| 100 mm | Vanha koolaus 50x100 mm, k600 + vanha puru-/kutterinlastueriste |
| 125-150 mm | Vanhat lattianiskat 50x125-150 mm, k600 + puru-/kutterinlastueriste |
| 25 mm | Vanha laudoitus |
| | Tuuletettu ryömintätila |
| | Vanha maatayttö |

VANHA RAKENNE 3, RYÖMINTÄTILAINEN RINTAMAMIES TALO
RAKENNELEIKKAUS:



RAKENNETYYYPIT:

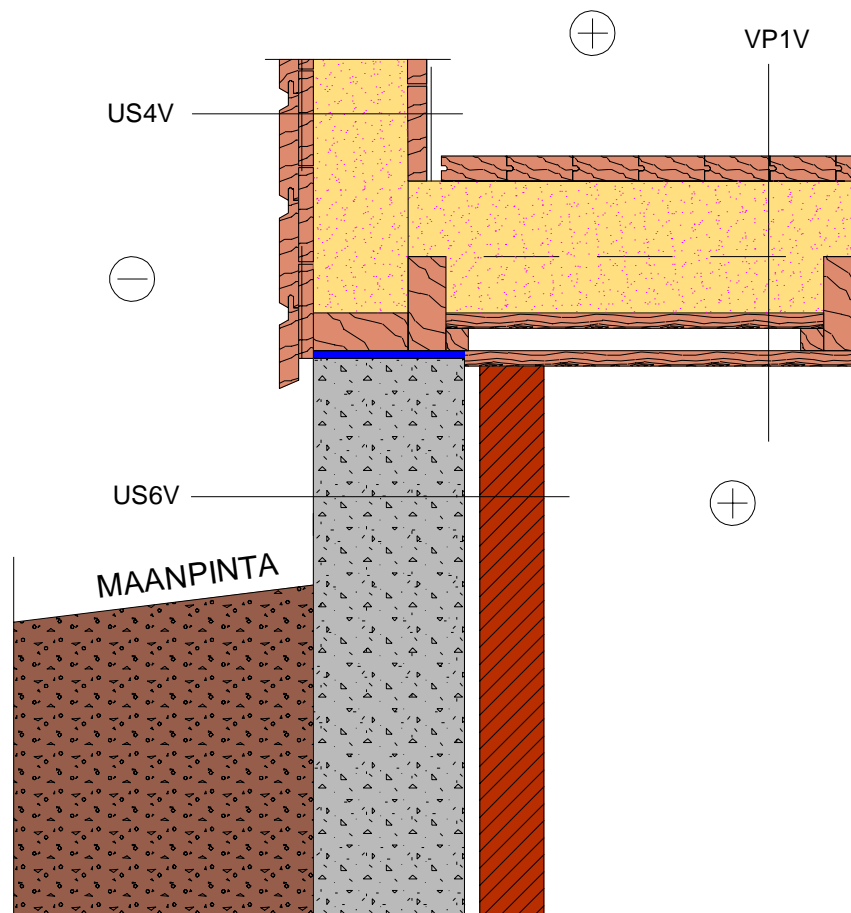
US4V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|--|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + vanha eriste (kutterinlastu, sahanpuru, metsäsammal) |
| 20 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi/pinkopahvi |
| | Vanha tapetti |

AP4V=AP2V: VANHA PUURAKENTEINEN RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA:

| | |
|------------|--|
| | Vanha lankkulattia |
| 100 mm | Vanha koolaus 50x100 mm, k600 + vanha eriste (kutterin lastu, sahanpuru, metsäsammal) |
| 125-150 mm | Vanhat lattianiskat 50x125-150 mm, k600 + vanha eriste 100 mm (kutterin lastu, sahanpuru, metsäsammal) |
| 20 mm | Vanha laudoitus |
| | Tuuletetty ryömintätila |
| | Vanha alustäyttö |

VANHA RAKENNE 4, KELLARILLINEN RINTAMAMIES TALO
RAKENNELEIKKAUS:



RAKENNETYYYPIT:

US4V: VANHA PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|--|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous |
| | Vanha rakennuspaperi/insuliittilevy |
| 20 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + vanha eriste (kutterinlastu, sahanpuru, metsäsammal) |
| 20 mm | Vanha vaakalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi/pinkopahvi |
| | Vanha tapetti |

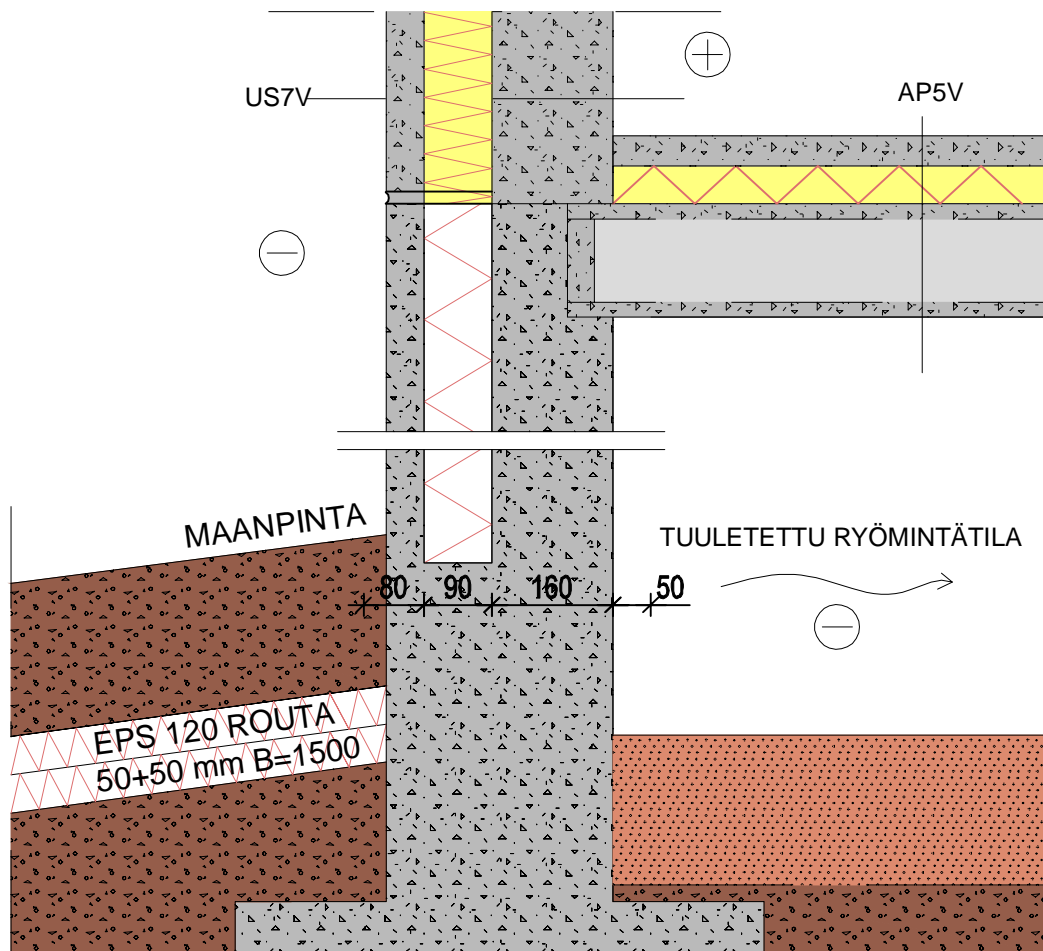
VP1: VANHA KELLARIN KATTO:

| | |
|------------|--|
| 33 mm | Vanha lankkulattia |
| 100 mm | Vanha koolaus 50x100 k600 + vanha eriste (kutterin lastu, sahanpuru, metsäsammal, lämmönjohtavuus 0,08-0,14 W/m2K) |
| 125-150 mm | Vanhat kattoniskat 50x125-150 k600 + vanha eriste 100 mm (kutterin lastu, sahanpuru, metsäsammal) vanha sisäverhous |

US6V: VANHA RINTAMAMIESTALON KELLARISEINÄ:

| | |
|--------|-------------------------|
| 200 mm | Soratäyttö/ulkoilma |
| | Vanha säästöbetoniseinä |
| | Ilmarako |
| | Vanha kevyttiiliseinä |

VANHA RAKENNE 5, 70-LUVUN RYÖMINTÄTILAINEN
PIENKERROSTALO, RAKENNELEIKKAUS:



RAKENNETYYYPIT:

US7V: VANHA SANDWICH-ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|----------------------------|
| 80 mm | Vanha betoniulkokuori |
| 90 mm | Vanha mineraalivillaeriste |
| 160 mm | Vanha kantava sisäkuori |

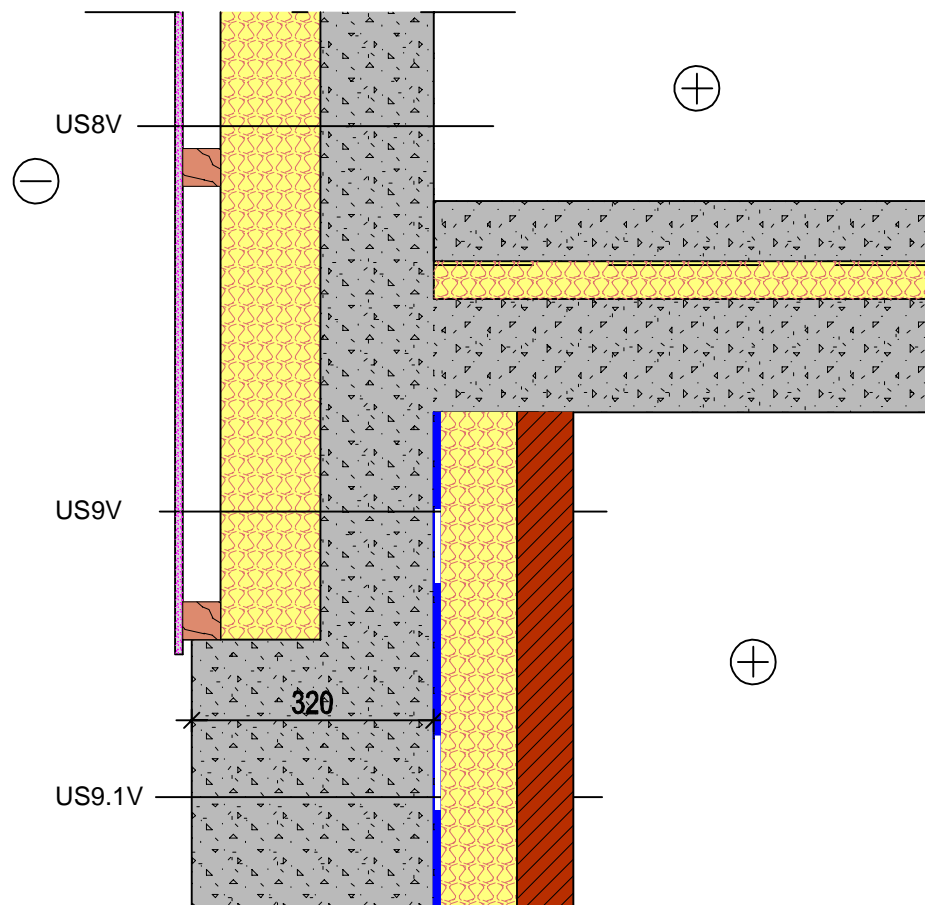
VANHA SOKKELI:

| | |
|--------|-------------------------------|
| 60 mm | Vanha sokkelin ulkokuori |
| 90 mm | Vanha sokkeli halkaisu, (EPS) |
| 160 mm | Vanha sokkelin sisäkuori |
| | Tuuletettu ryömintätila |

AP5V: VANHA ALAPOHJA

| | |
|---------|---|
| 40 mm | Vanha pintavalu |
| 50 mm | Vanha eriste jäykkä mineraalivilla |
| 150 mm | Vanha ontelolaatta/paikallavalettu kantava betonilaatta |
| >800 mm | Tuuletettu ryömintätila |
| | Vanha maatayttö |

VANHA RAKENNE 6, 50-LUVUN PAIKALLA VALETTU BETONIRUNKOINEN KERROSTALO, RAKENNELEIKKAUS:



RAKENNETYYYPIT:

US8V: VANHA BETONIRAKENTEINEN ULKOSEINÄ:

| | |
|--------|---|
| | Vanha ulkoverhouslevy |
| | Alusrimoitus ja ilmarako |
| 100 mm | Vanha puinen pystyrunko 50x100 mm k600 + lastuvillalevy |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |

US9V: VANHA BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ:

| | |
|--------|---|
| | Vanha ulkoverhouslevy |
| | Vanha alusrimoitus + ilmarako |
| 100 mm | Vanha puurakenteinen pystyrunko 50x100 mm k600 + lastuvillalevy |
| 160 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 100 mm | Vanha lastuvillalevy |
| 75 mm | Vanha sahajauhottiili |

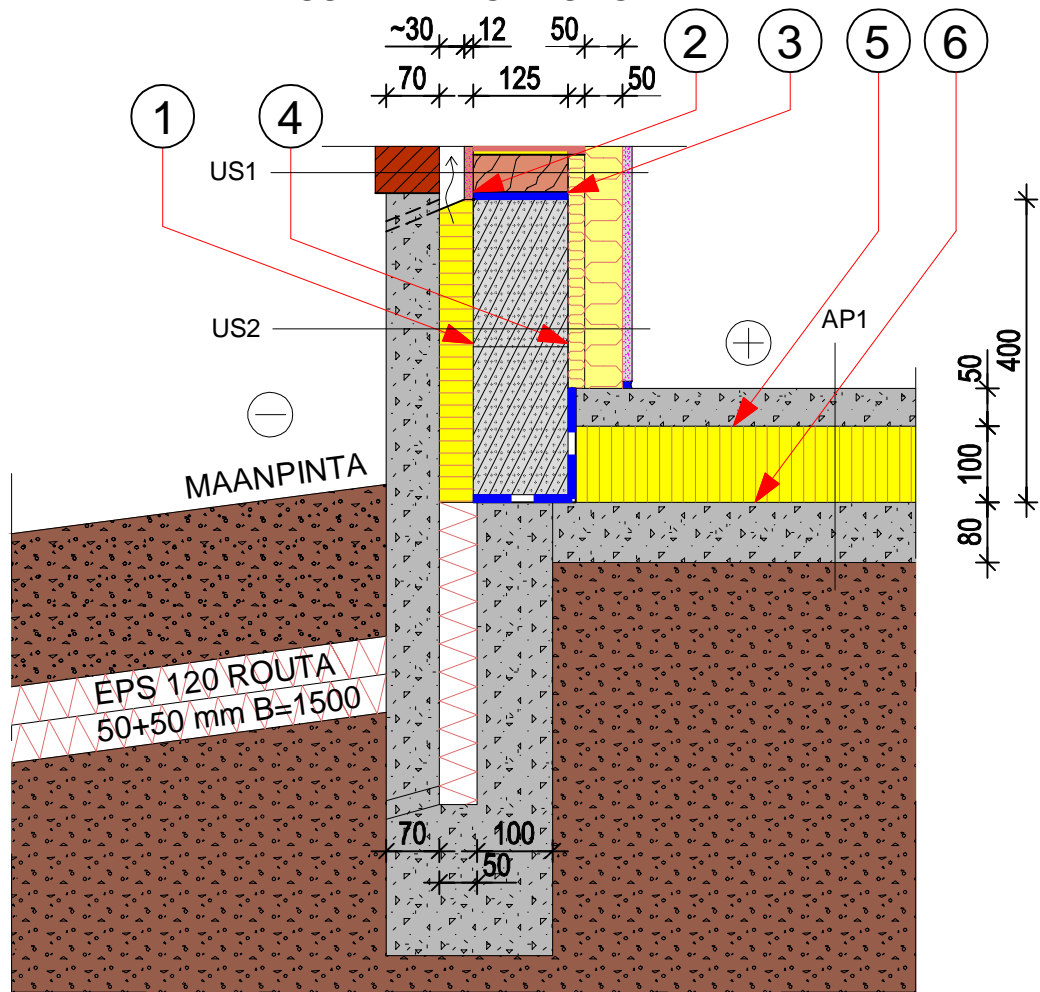
US9.1V: VANHA BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ:

| | |
|--------|------------------------------------|
| 320 mm | Vanha paikalla valettu betoniseinä |
| | Vanha vedeneristys, bitumisively |
| 100 mm | Vanha lastuvillalevy |
| 75 mm | Vanha sahajauhottiili |

A cross-section diagram of a wall assembly. The top section, labeled 'US10V', shows a brick wall with a vertical pink textured strip on the left and a horizontal grey textured strip on the right. The bottom section, labeled 'US11V', shows a brick wall with a vertical grey textured strip on the left and a horizontal yellow textured strip on the right. A blue vertical line separates the two sections. To the left of the US11V section is a negative sign (⊖) and to the right is a positive sign (⊕).

| | |
|--------|---|
| 40 mm | Vanha teräsbetoni ylälaatta |
| 370 mm | Vanhan alalaattapalkiston teräsbetonipalkit + vanha eriste (kutterinlastu, koksikuona) |
| 40 mm | Vanha teräsbetoni alalaatta |

RAKENNE 1, 70-LUVUN PIENTALO
RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:



RAKENNETYYYPIT:

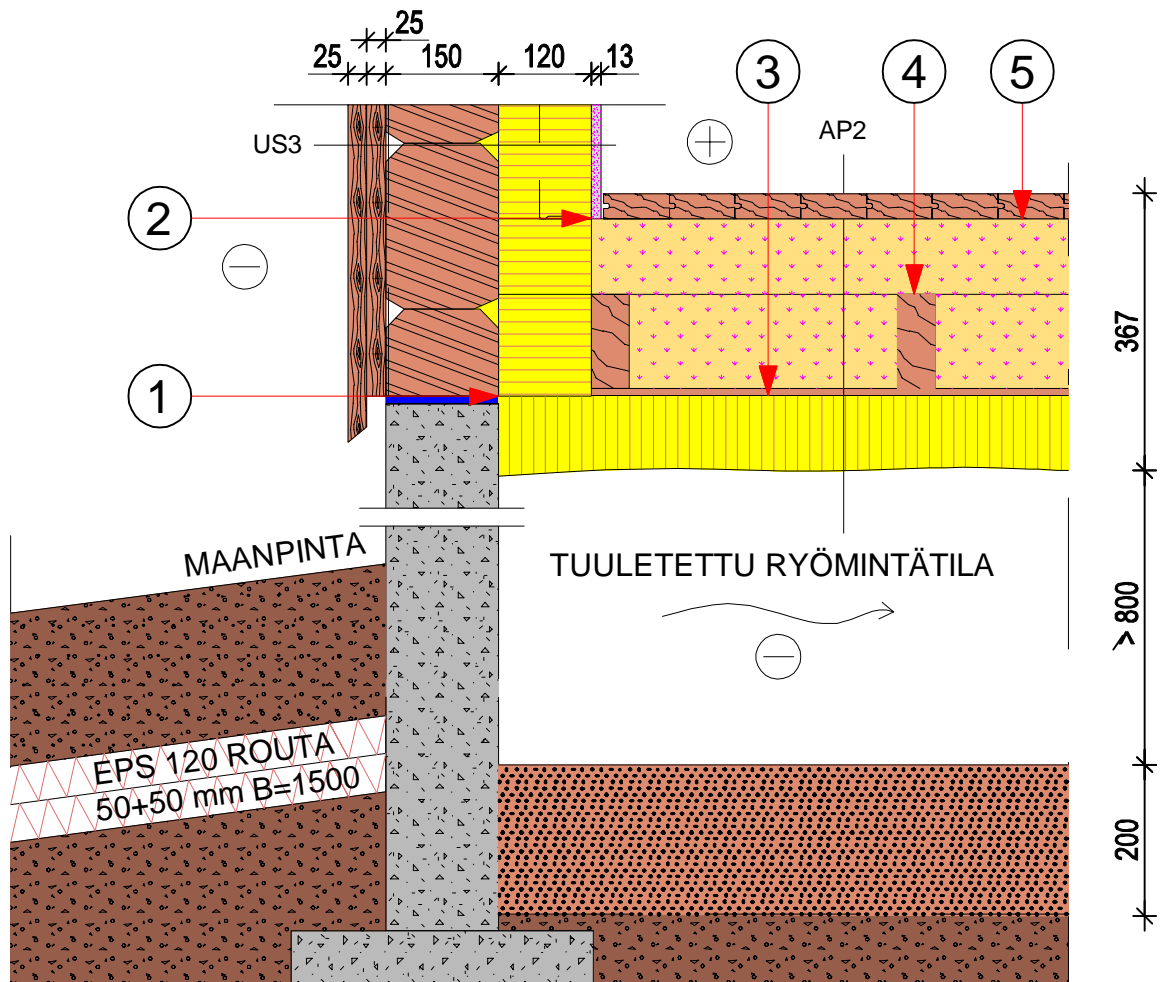
US2: KORJATTU ULKOSEINÄN ALAOSA: U-arvo 0,17W/m²K

| | |
|----------|-----------------------------------|
| 70 mm | Vanha betoninen valesokkeli 70 mm |
| ~45 mm | Ekospray 40E 70 mm |
| 125 mm | Kevybetoniharkko |
| 22+50 mm | Puukoolaus + mineraalivilla 70 mm |
| 13 mm | Kipsilevy |

AP1: KORJATTU MAANVASTAINEN BETONI ALAPOHJA:

| | |
|--------|---------------------|
| 50 mm | Pintaverhous |
| 50 mm | Pintabetonilaatta |
| 100 mm | Ekospray 40E 100 mm |
| 80 mm | Vanha betonilaatta |

UUSI RAKENNE 2, HIRSIRUNKOINEN PIENTALO
RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:

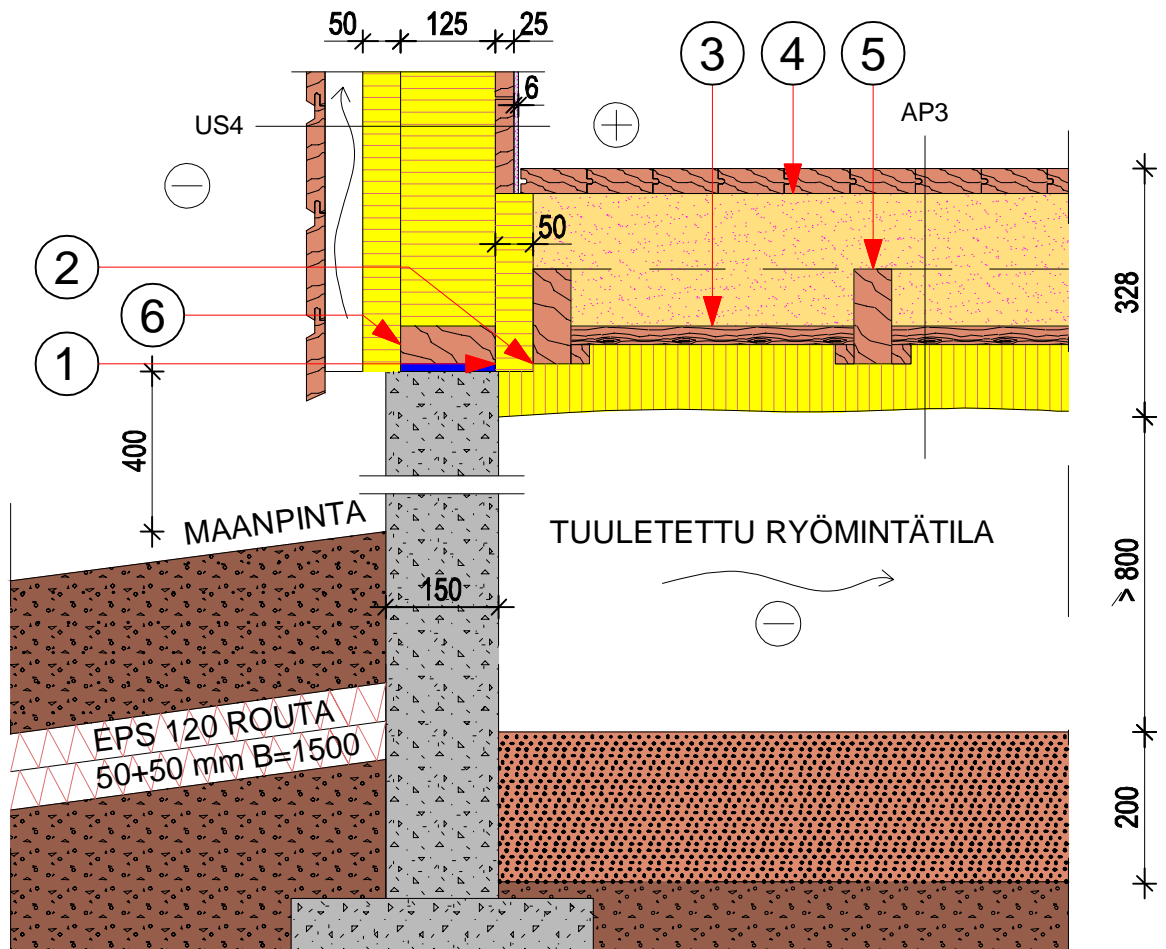


RAKENNETYYYPIT:

US3: LISÄERISTETTY PUUPERHOILTU HIRSISEINÄ: U-arvo 0,16 W/m²K

| | |
|--|--|
| 25 mm | Vanha pystylomalaudoitus |
| | Vanha rakennuspaperi |
| 150 mm | Vanha vaakahirsirunko |
| 120 mm | Ekospray 40E 120 mm + teräsrankaseinä 68 mm k600 (54 mm irti hirsiseinästä) |
| 13 mm | Kipsilevy |
| AP2: PUURAKENTEINEN RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA, ERISTYS UUSITTU: | |
| | Lankkulattia |
| 100 mm | Vanha koolaus 50x100 mm, k600 + puukuitueriste |
| 125-150 mm | Vanhat lattiaaniskat 50x125-150 mm, k600 + puukuitueriste |
| 9 mm | Homesuojattu havuvaner |
| 100 mm | Ekospray 40E 100 mm |
| >800 mm | Tuuletettu ryömintätila |
| >200 mm | Kevytsora |
| | Suodatinkangas |
| | Soratäyttö |

UUSI RAKENNE 3, RYÖMINTÄTILAINEN RINTAMAMIES TALO
RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:



RAKENNETYYPIIT:

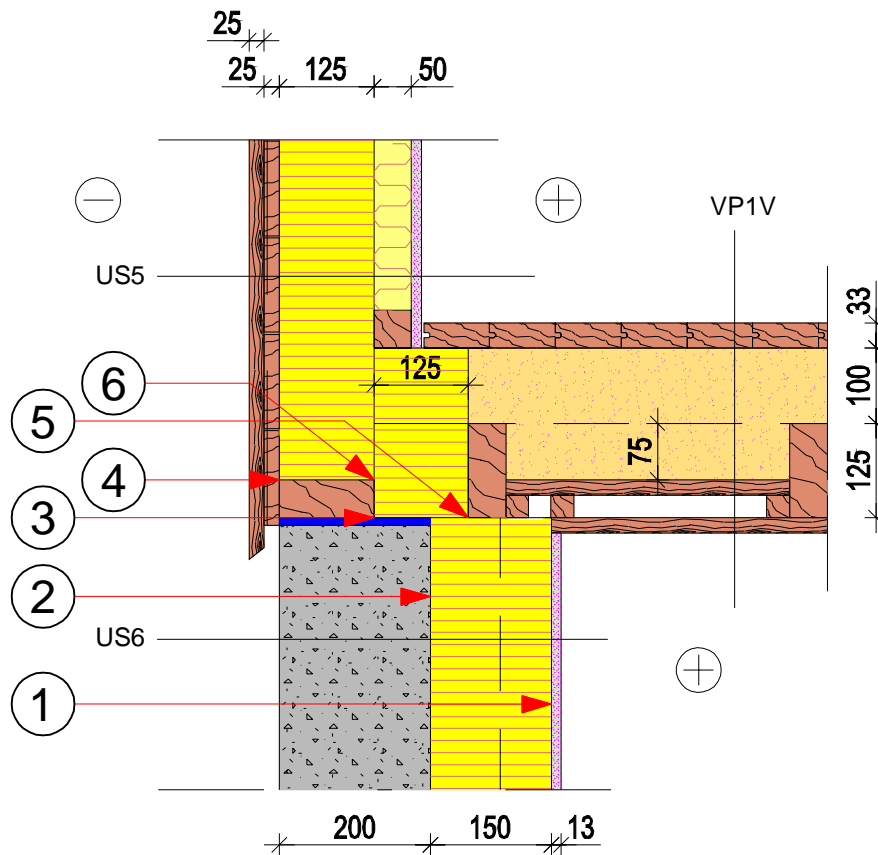
US4: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ, ERISTEET UUSITTU ULKOPUOLELTA
U-arvo 0,17 W/m²K:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Puu-ulkooverhous, vaakapaneeli |
| 50 mm | Pystykoolaus 50 mm + tuuletusväli |
| 50 mm | Ekospray 40E 50mm |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + ekospray 40E 125 mm |
| 25 mm | Vanha vaakalautoitus |
| 6 mm | Saneerauskeepsilevy |
| 50 mm | Lattiarakenteen kohdalla lisäeristys ekospray 40E 50 mm |

AP3: ALAPUOLELTA LISÄERISTETTY PUURAKENTEINEN
RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA:

| | |
|------------|---|
| | Vanha lankkulattia |
| 100 mm | Vanha koolaus 50x100 k600 + vanha eriste (kutterin lastu, sahanpuru) |
| 125-150 mm | Vanhat lattianiskat 50x125-150 k600 + vanha eriste 100 mm (kutterin lastu, sahanpuru) |
| 25 mm | Vanha laudoitus |
| 70-100 mm | Ekospray |
| >800 mm | Tuuletettu ryömintätila |
| >200 mm | Kevytsora |
| | Suodatinkangas |
| | Soratäyttö |

UUSI RAKENNE 4, KELLARILLINEN RINTAMAMIES TALO RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:



RAKENNETYYYPIT:

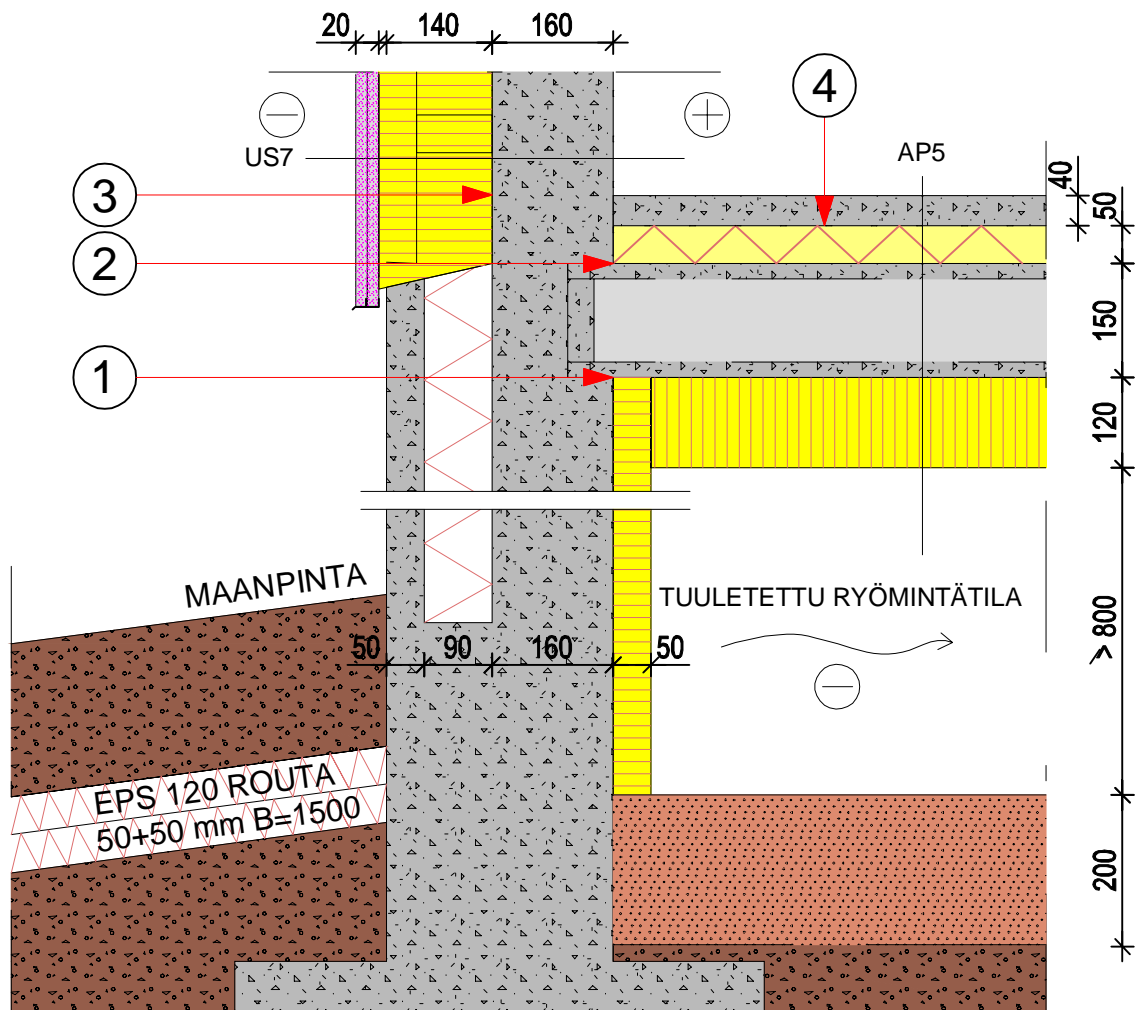
US5: PUURUNKOINEN ULKOSEINÄ, ERISTEET UUSITTU SISÄPUOLELTA
U-arvo 0,15 W/m²K:

| | |
|--------|---|
| 25 mm | Vanha puu-ulkoverhous |
| 25 mm | Vanha rakennuspaperi |
| 25 mm | Vanha vinolaudoitus |
| 125 mm | Vanha puurunko 50x125 mm + ekospray 40E 125 mm |
| 50 mm | Puukoolaus 50x50 mm + mineraalivillaeriste (lambda 0,036) |
| 13 mm | Kipsilevy |

US6: KELLARISEINÄ, ERISTETTY SISÄPUOLELTA: U-arvo 0,17 W/m²K

| | |
|--------|---|
| 50 mm | Soratäyttö |
| 50 mm | EPS 120 routaeristelevy 50 mm |
| | Vedeneristys |
| 200 mm | Vanha säästöbetoniseinä |
| 150 mm | Ekospray 150 mm + teräsrunkaseinä 68 mm k600 |
| 13 mm | Kipsilevy |
| | (Maan yläpuolinen ulkopuolen osuus ilman soratäyttöä, EPS-levyä ja vesieristettä) |

UUSI RAKENNE 5, 70-LUVUN RYÖMINTÄTILAINEN
PIENKERROSTALO, RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:



RAKENNETYYYPIT:

US7: KORJATTU SANDWICH-ELEMENTTI ULKOSEINÄ: U-arvo 0,17 W/m²K

| | |
|--------|--|
| ~10 mm | Ohut rappaus |
| 10 mm | Rappauslevy |
| 150 mm | Ekospray 40E 150 mm + teräskoolaus |
| 160 mm | Vanha sandwich-elementin kantava sisäkuori |

LISÄERISTETTY SOKKELI:

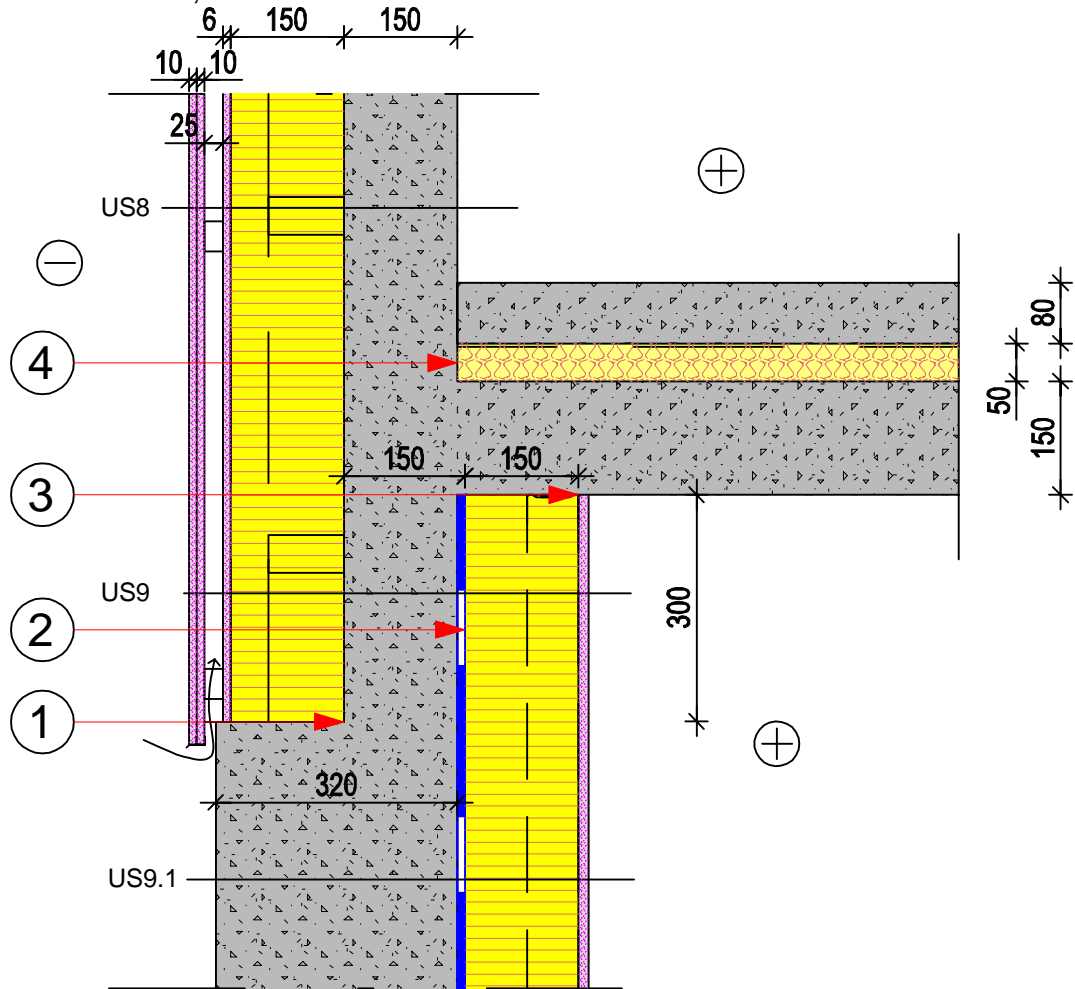
| | |
|--------|-------------------------------|
| 60 mm | Vanha sokkelin ulkokuori |
| 90 mm | Vanha sokkeli halkaisu, (EPS) |
| 160 mm | Vanha sokkelin sisäkuori |
| 50 mm | Ekospray 40E |
| | Tuuletettu ryömintätila |

AP5: ALAPUOLELTA LISÄERISTETTY RYÖMINTÄTILAINEN ALAPOHJA

U-arvo 0,16 W/m²K:

| | |
|---------|---|
| 40 mm | Vanha pintavalu |
| 50 mm | Vanha eriste, jäykkä mineraalivilla |
| 150 mm | Vanha ontelolaatta/paikallavalettu kantava betonilaatta |
| 120 mm | Ekospray 40E |
| >800 mm | Tuuletettu ryömintätila |
| >200 mm | Kevytsora |
| | Suodatinkangas |
| | Soratäyttö |

UUSI RAKENNE 6, 50-LUVUN PAIKALLA VALETTU BETONIRUNKOINEN KERROSTALO, RAKENNELEIKKAUS + TARKASTELUPISTEET:



RAKENNETYYYPIT:

US8: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN ULKOSEINÄ: U-arvo 0,17 W/m²K

- ~10 mm Ohut rappaus
- 10 mm Rappauslevy
- 25 mm Tuuletusväli + tuuletusreiällinen teräs hattuorsi
- 6 mm Tuulensuojaluja 6 mm (vähintään B-s1, d0)
- 150 mm Ekospray 40E + teräskoolaus
- 150 mm Vanha paikalla valettu betoniseinä/sandwich sisäkuori

US9: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ: U-arvo 0,08 W/m²K

- ~10 mm Ohut rappaus
- 10 mm Rappauslevy
- 25 mm Tuuletusväli + tuuletusreiällinen teräs hattuorsi
- 6 mm Tuulensuojaluja 6 mm (vähintään B-s1, d0)
- 180 mm Ekospray 40E + teräskoolaus
- 150 mm Vanha paikalla valettu betoniseinä/sandwich sisäkuori
- Vanha vedeneristys, bitumisively
- 150 mm Ekospray 40E+ teräskoolaus k600
- 13 mm Kipsilevy 13 mm

US9.1: KORJATTU BETONIRAKENTEINEN KELLARISEINÄ: U-arvo 0,16 W/m²K

- 320 mm Vanha paikalla valettu betoniseinä
- Vanha vedeneristys, bitumisively
- 150 mm Ekospray 40E + teräskoolaus k600
- 13 mm Kipsilevy 13 mm

